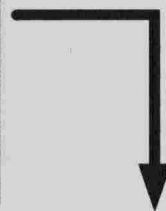
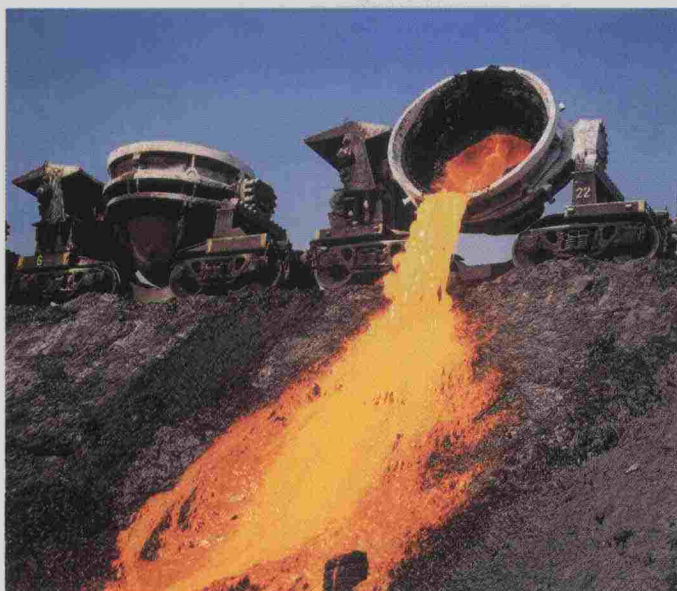




Tielaitos

Marko Mäkikyrö

LD-teräskuona tienrakennusmateriaalina



**Tielaitoksen
selvityksiä
46/1996**

Oulu 1996

**Geokeskus
Oulun kehitysyksikkö**

Tielaitoksen selvityksiä
46/1996

Marko Mäkikyrö

LD-teräskuona tienrakennusmateriaalina

Tielaitos
Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö

Oulu 1996

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-253-1
TIEL 3200414
Oy Edita Ab
Helsinki 1996

Julkaisun kustannus ja myynti:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotepalvelut
Telefax (90) 1487 2652
1.10.1996 alkaen: 0204 44 2652

Joutsenmerkin arvoinen paperi

Tielaitos

Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI

Geokeskus
Oulun kehitysyksikkö
Kansankatu 53
PL 261
90101 OULU
Puh. (981) 310 9383
1.10.1996 alkaen: 0204 44 158

TIIVISTELMÄ

Tässä selvityksessä on kirjallisuuden perusteella tarkasteltu LD-teräskuonan käyttöä tienrakennuksessa. Suomessa LD-teräskuonaa ei ole käytetty tienrakennuksessa yhtä vakiintuneesti kuin masuunikuonaa, vaikka se monilta ominaisuuksiltaan on verrattavissa masuunikuonaan. Ainoastaan päällystemassoissa LD-teräskuonaa on käytetty laajemmassa mittakaavassa. Viime aikoina on Suomessa tutkimustoimintaa voimakkaasti lisätty, jotta edellytykset LD-teräskuonan laajemmallekin käytölle tienrakennuksessa tulisivat mahdollisiksi. Syynä tähän on LD-teräskuonan potentiaaliset ominaisuudet tienrakennusmateriaalina, hyvien luonnonmateriaalien yhä vaikeampi saatavuus ja ominaisuuksiltaan samankaltaisen ilmajäähdytetyn masuunikuonan tuotannon huomattava väheneminen.

Päällysteseosten materiaalina teräskuona on kulutuskestävyysominaisuuksiltaan yhtä hyvä tai jopa parempi kuin tavanomaiset perinteiset sepelit ja murskeet. Lisäkustannuksia kuljetuksiin aiheuttava suuri paino voidaan hyödyntää esimerkiksi siten, että päällysteiden paksuutta voidaan monissa tapauksissa ohentaa käytettäessä teräskuonaa runkoaineena.

Tien rakennekerroksissa teräskuonan käyttö on rajoittunut lähinnä eriasteisiin kokeiluihin, joissa on selvitetty kuonan käyttäytymistä ja ominaisuuksia. Tutkimustoiminta on painottunut mahdollisesta paisumisesta aiheutuvien haittojen ennakointiin ja eliminointiin. Tästä johtuen teräskuonan paisumismekanismi ja siihen vaikuttavat tekijät ovat niin hyvin tiedossa, että paisuminen on hallittavissa oleva ominaisuus. Teräskuonaa on kokeiluissa käytetty joko sellaisenaan tai erilaisina seoksina masuunikuonan ja luonnonkiviaineksen tai molempien kanssa yhtä aikaa. Myöskin kalkkia ja kipsiä on näissä seoksissa kokeiltu. Ulkomaisissa tutkimuksissa on todettu teräskuonan olevan hyvä tienrakennusmateriaali sekä sellaisenaan että erilaisissa seoksissa käytettäessä.

Penkereissä ja täyöissä teräskuonaa on käytetty lähinnä silloin, kun erityisiä vaatimuksia paisumisesta aiheutuvan tilavuuden muutosten suhteen ei ole asetettu. Näihin kohteisiin ja maisemointitöihin on määrällisesti käytetty huomattavia määriä teräskuonaa.

Massa- ja syvästabiloinnissa teräskuona on vielä suhteellisen tuntematon materiaali. Ainoastaan joitakin kokeiluja on tehty. Kokemukset näistä ovat olleet positiivisia.

Key words: road construction, materials, by-products, stabilization, steel slag

ABSTRACT

The paper discusses the use of LD steel slag for road construction purposes in the light of published reports. LD steel slag has not yet established its position as a road construction material in Finland to the same extent as blastfurnace slag. Although it resembles the latter in many ways, it has only been used extensively in pavement mixtures. Research has been intensified in Finland in recent times, however, to promote its use for road construction purposes, in view of its potential properties as a construction material, the increasing difficulty of obtaining natural materials and the sharp decline in the production of air-cooled blastfurnace slag.

Steel slag can be regarded as an equally good or even better pavement mixture material than ordinary crushed rock and crushed aggregate, thanks to its good resistance to wear. Although its heavy weight increases transportation costs, this is compensated for by the fact that its use as an aggregate allows thinner overlays in many cases.

The use of steel slag in the structural layers of roads has so far been restricted mainly to experiments concerned with its behaviour and properties. Extensive research into the anticipation and elimination of possible expansion defects has yielded so much information on the mechanism of its expansion and factors pertaining to this that expansion as such can be regarded as a controllable property. Steel slag was used in these experiments either as such or as mixtures with blastfurnace slag, natural rock or both. The use of limestone and gypsum in these mixtures was also tested. According to this literature survey steel slag has been found in other countries to be a good road construction material both alone and in various mixtures.

Steel slag has been used in embankments and as filling material mainly in cases where no specific requirements have been placed on volume changes due to expansion. Large amounts have consequently been used for these purposes, and also for landscaping.

Steel slag is still a fairly unknown as stabilizing agent in mix- and deep stabilization, though the experiences gained from the few experiments conducted so far have been encouraging.

ALKUSANAT

Oulun yliopiston Rakentamistekniikan osaston Geotekniikan laboratoriossa käynnistyi vuoden 1995 helmikuussa viisivuotinen tutkimusprojekti, jonka lopputuloksena on vuosituhatlukuun loppuun mennessä suunnittelu-, mitoitus- ja rakennusohjeet kuonatuotteiden käytölle geo- ja tietekniikassa. Yksi osa tutkimusprojektia on Oy Fundia Wire Ab:n Koverharin tehtaalla ja Rautaruukki Oy:n Raahen tehtaalla tuotettavan LD-teräskuonan käytön kehittäminen tienrakennusmateriaalina. Lähtöajatuksena LD-teräskuonan hyödyntämisessä on ilmajäähdytetyn masuunikuonan kaltainen massiivikäyttö ja toisaalta LD-teräskuonan sideaineominaisuuksien hyödyntäminen stabiloinneissa. Tämän pohjalta päätettiin tehdä kirjallisuusselvitys, jotta saadaan viitteitä siitä, mitä ulkomainen tutkimustoiminta on teräskuonan osalta käsitellyt. Tämä kirjallisuusselvitys toimii osittaisena perustana, kun jatketaan suomalaisen LD-teräskuonan hyötykäytön kehittämistä.

Kuonat geotekniikassa -projektin rahoittavat SKJ Yhtiöt Oy, Rautaruukki Oy ja TEKES. Hankkeeseen osallistuu myös Tielaitoksen geokeskuksen Oulun kehitysyksikkö ja Oulun tiepiiri. Tutkimusprojektia ohjaa johtoryhmä, johon kuuluvat FT Aimo Hiltunen (puheenjohtaja) ja rakennuspäällikkö Jari Lappi SKJ Yhtiöt Oy:stä, DI Esko Pöyliö Rautaruukki Oy:stä, DI Seppo Salmenkaita Tielaitoksen geokeskuksen Oulun kehitysyksiköstä sekä TkT Kauko Kujala ja DI Marko Mäkiyry (sihteeri) Oulun yliopiston geotekniikan laboratorios-
ta.

Oulussa kesäkuussa 1996

Geokeskus
Oulun kehitysyksikkö

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	LD-TERÄSKUONAN TUOTANTO JA OMINAISUUDET	7
2.1	Teräksen valmistus happipuhallus- eli konvertertiprosessilla	7
2.2	Teräskuonien tuotanto Suomessa	8
2.3	LD-teräskuonan käytön jakaantuminen	8
2.4	Tekniset ja fysikaaliset ominaisuudet	9
2.5	Kemiallinen ja mineraloginen koostumus	9
2.6	Paisuminen	10
2.6.1	Paisumiseen vaikuttavat tekijät	10
2.6.2	Paisuntatestit ja -laitteet	12
2.6.3	Paisumisen hallinta	14
2.7	Lujittuminen	16
3	TERÄSKUONA TIERAKENTEES	17
3.1	Kulutuskerrokset	17
3.2	Rakennekerrokset	18
3.2.1	Sitomattomat rakennekerrokset	18
3.2.2	Sidotut rakennekerrokset	20
3.3	Penkereet ja täytöt	27
3.4	Massa- ja syvästabilointi	27
4	LD-TERÄSKUONA SUOMEN TIENRAKENNUKSE	28
4.1	Laboratoriotutkimukset	28
4.2	Koerakenteet	30
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	34
6	KIRJALLISUUSLUETTELO	36

1 JOHDANTO

Tienrakennuksessa käytettävien luonnonmateriaalien, kuten soran ja murskeen, yhä vaikeampi saatavuus on pakottanut tienrakentajat etsimään uusia, vaihtoehtoisia materiaaleja. Terästeollisuuden sivutuotteina syntyvät kuonat ovat olleet yksi varsin varteenotettava vaihtoehto luonnonmateriaaleille. Kuonatuotteet ovatkin joiltakin ominaisuuksiltaan jopa parempia kuin perinteiset sorat ja murskeet. Suomessa on jo vuosikymmeniä käytetty masuunikuonaa tienrakennusmateriaalina. Systemaattisen käytön voidaan katsoa alkaneen 1980-luvulla ja se on jo vakiintunut 1990-luvulle tultaessa.

Ilmajäähdytettyjen masuunikuonatuotteiden pääasialliset käyttökohteet ovat olleet tien kantavassa ja jakavassa kerroksessa. Vesijäähdytettyä masuunikuonaa eli masuunihiekkaa on käytetty sekä massiivirakenteena että stabi-loinnin sideaineena.

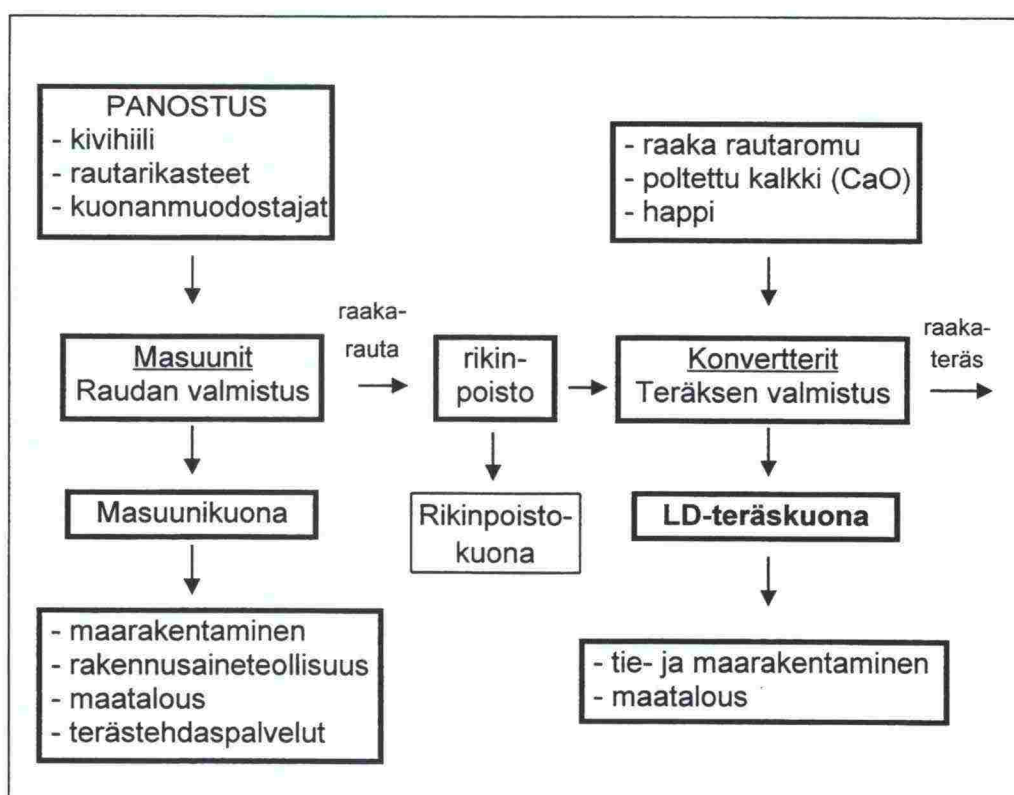
Teräskuonaa ei ole tienrakennuksessa käytetty kuin muutamissa yksittäistapauksissa. Kuitenkin koerakenteista on saatu lupaavia tuloksia sen soveltumisesta tienrakennukseen monilta osin samantyyppisissä kohteissa, missä on käytetty ilmajäähdytettyä masuunikuonaa. Asfalttipäällysteiden runkoaineena teräskuonalla on todettu olevan hyviä ominaisuuksia tavanomaisiin kiviaineksiin verrattuna.

Tämän kirjallisuusselvityksen yksi tarkoitus on ollut kartoittaa, miten Suomessa tuotettavan LD-teräskuonan käytön kehitystä on suunnattava, jotta vuosituhannen loppuun mennessä rakentajien ja suunnittelijoiden käytössä olisi ohjeistus LD-teräskuonan käytölle tienrakennuksessa. Selvityksessä on luotu katsaus teräskuonan erilaisiin sovelluksiin tienrakennusmateriaalina. Lisäksi on tarkasteltu teräskuonan erityispiirteitä tavanomaiseen kiviainekseen ja masuunikuonaan verrattuna. Kirjallisuusselvitys pohjautuu pääosiltaan ulkomaisiin artikkeleihin, mutta myös LD-teräskuonan käyttöä ja tutkimustoimintaa Suomessa on tarkasteltu lyhyesti.

2 LD-TERÄSKUONAN TUOTANTO JA OMINAISUUDET

2.1 Teräksen valmistus happipuhallus- eli konvertteriprosessilla

Masuunissa valmistettu raakarauta sisältää 4-5 % hiiltä. Teräksen valmistusprosessissa hiilipitoisuus alennetaan halutulle tasolle polttamalla ylimääräinen hiili eli mellottamalla rauta. Teräsprosessissa alennetaan myös muiden 'epäpuhtaiden' aineiden määrää sallitulle tasolle /46/. Kuvassa 1 on esitetty raakaraudan ja -teräksen tuotantokaavio sekä muodostuvat kuonat.



Kuva 1: Raakaraudan ja -teräksen tuotantokaavio sekä muodostuvat kuonat.

LD-menetelmä on happipuhallusmenetelmistä yleisin. Nimi tulee itävaltalaisista Linzin ja Donawitzin kaupungeista, joissa menetelmä kehitettiin 1950-luvulla. Tässä menetelmässä happi puhalletaan konvertteriin eli reaktioastiaan ylhäältä lasketun lanssin kautta /46/.

Konvertteriin panostetaan jäähdytysromu ja sula raakarauta sekä lisätään poltettu kalkki ja mahdolliset fluksiaineet. Happipuhallus tapahtuu noin kaksinkertaisella äänennopeudella. Happivirta sekoittaa raudan ja kuonan yhteiseksi emulsioksi /46/.

Puhalluksen päätyttyä konvertteri kallistetaan ja sula teräs kaadetaan konvertterin kyljessä olevan aukon kautta valusenkaan. Lopuksi kuona kaadetaan kuonavaunuihin, joista kuona kaadetaan kuonapenkalle jäähtymään.

/46/. Jäähtyneen kuonan jatkokäsittely sisältää yleensä murskauksen, metallin poiston ja luokituksen /40/. Rautaruukki Oy:n Raahen tehtaalla ja Fundia Wire Oy Ab:n Koverharin tehtaalla tuotettavista LD-teräskuonista käytetään usein myös nimityksiä konverterrikuona ja LD-kuona.

2.2 Teräskuonien tuotanto Suomessa

Suomessa tuotetaan teräskuonia neljässä eri tuotantolaitoksessa. Taulukossa 1 on esitetty k.o. tuotantolaitokset ja niiden kuonatuotanto.

Taulukko 1: Teräskuonien tuotanto Suomessa /13/.

Tuotantopaikka	Syntyvät kuonat	Kuonan määrä [tn]
Rautaruukki Oy, Raahen tehdas	LD-teräskuona (=konverterrikuona, LD-kuona)	132 000
Fundia Wire Oy Ab Koverharin tehdas	LD-teräskuona (=konverterrikuona, LD-kuona)	28 000
Outokumpu Polarit Oy Tornion tehdas	Terässulattokuona (=kalkkikuona) Ferrokromikuona (=OKTO-murske, OKTO-eriste)	n. 155 000 n. 260 000
Imatra Steel Imatran tehdas	Valokaariuunin teräskuona	160 000

2.3 LD-teräskuonan käytön jakaantuminen

LD-teräskuonan tuotanto oli vuonna 1995 Suomessa 160 000 tonnia. Tästä määrästä hyödynnettiin 94 %. Aikaisemmin tapahtunut merkittävä LD-teräskuonan kierrätys tehtaan prosessissa on lopetettu teräksen laatuvaatimusten vuoksi /13/. LD-teräskuonan käytön jakauma Suomessa vuonna 1995 on esitetty taulukossa 2. Huomattavimmat käyttökohteet ovat maatalous ja tienrakennus. Maatalouskuonan rakeisuus on välillä 0-3 mm. Tienrakennuksessa on käytetty asfaltin runkoaineena LD-teräskuonaa, jonka rakeisuus on välillä 10-18 mm. Myös tien rakennekerroksissa on LD-teräskuonaa käytetty jonkin verran.

Taulukko 2: LD-teräskuonan käytön jakauma Suomessa vuonna 1995 /13/.

Käyttökohde	Käyttö [tn]	Osuus [%]
Tienrakennus	39 600	26,5
Maatalous	109 800	73,5
Yhteensä	149 400	100,0

2.4 Tekniset ja fysikaaliset ominaisuudet

Teräskuonat poikkeavat joiltakin ominaisuuksiltaan masuunikuonista. Teräskuonilla on korkea tilavuuspaino ja potentiaalinen taipumus paisua. Tilavuuden muutos voi olla jopa 10 % johtuen kalsium- ja magnesiumoksidien hydratoitumisesta. Masuunikuonat puolestaan omaavat suhteellisen pienen tilavuuspainon ja ovat stabiileja /8/. Teräskuonat ovat masuunikuonia vähemmän huokoisia. Niiden ominaispaino on luokkaa 3,2-3,6. Mohsin kovuusasteikolla teräskuonat ovat luokkaa 5-7 masuunikuonan ollessa noin 6 /29/. Esimerkiksi kalimaasälpää, jonka kovuus on 6, voi vielä naarmuttaa teräspiikillä, mutta kvartsia (kovuus 7) ei.

Teräskuonat kestävät hyvin kulutusta päällysteessä käytettäessä /23/. Myös kestävyys toistuvien sulamisten ja jäätymisten aiheuttamaa rasitusta vastaan on hyvä /12, 37/. Masuunikuonien tavoin teräskuonilla on raemuodosta johtuen korkea sisäinen kitka ja rakeet liittyvät hyvin toisiinsa. Murskatun teräskuonan sisäinen kitkakulma on yleensä luokkaa 45-50° /37/. Taulukossa 3 on esitetty Raahen ja Koverharin tehtaiden LD-teräskuonien keskimääräisiä laatuominaisuuksia.

Taulukko 3: Suomalaisten LD-teräskuonien keskimääräisiä laatuominaisuuksia 1980-luvulta. Vertailumateriaalina on graniittinen kiviaines /1/.

Laatu- ominaisuus	LD-teräskuona		Graniitti
	Raahen	Koverhar	
Los Angeles -luku	16	29-32	24-26
Muotoarvo (c/a ja b/a)	2,0/1,4	1,8-2,0/1,3-1,4	2,5/1,4
Haurausarvo	41	50-66	52-56
Parannettu haurausarvo	13	30	20-26
Hioutuvuusluku	1,0	1,7	1,4-1,6
Kiintotiheys, g/cm ³	3,56	3,24	2,6-2,7
pH-arvo	12,2	12,1	8,5-9,3 ¹⁾
Absorptioarvo (# 8-12 mm)	1,6	2,9	

1) pH:t mitattu neljästä murskeesta, joista kaksi oli graniittista, yksi peridotittia ja yksi kiilleliuskeista /32/.

2.5 Kemiallinen ja mineraloginen koostumus

Teräskuonilla on masuunikuonaan verrattuna seuraavia eroja:

- alempi SiO₂ - määrä
- hyvin alhainen Al₂O₃ - määrä
- hyvin korkeat määrät rautaoksideoja
- teräskuonat sisältävät vapaata kalkkia (1-15 %, joskus jopa 20 %) /49, 51/.

Teräskuonien kemiallisesta koostumuksesta on huomattava, että siinä on vaihtelua eri tuotantolaitosten välillä. Vaihtelua voi olla jopa samassa tuotan-

tolaitoksessa /8, 9/. Raahen ja Koverharin konvertterikuonien kemialliset koostumukset ovat kuitenkin lähellä toisiaan. Tyypilliset analyysit on esitetty taulukossa 4. Samassa taulukossa on esitetty myös masuunikuonan ja sementin kemialliset koostumukset. Ulkomaisiin teräskuoniin verrattuna suomalaisissa LD-kuonissa on keskimäärin enemmän poltettua kalkkia (CaO) ja vähemmän magnesiumoksidia (MgO). Tästä on etua, kun teräskuona prosessoidaan paisumattomaksi.

Taulukko 4: Suomessa tuotettujen masuunikuonien, LD-teräskuonien ja portlandsementin kemialliset koostumukset /14, 32/.

Yhdiste	Yhdisteen määrä, %				
	Masuunikuona		LD-teräskuona		Portlandsementti
	Raahe	Koverhar	Raahe	Koverhar	
SiO_2	35,5	37,4	14,8	11,4	18-24
CaO	37,2	36,2	51,8	56,5	60-70
MgO	11,4	12,7	1,8	1,3	0-3
Al_2O_3	8,5	9,5	2,3	0,93	3-8
Fe_{tot}	0,43	0,10	11,8	10,4	2-6 ¹⁾
1) FeO :n määrä					

Teräskuona koostuu pääasiassa viidestä mineraalifaasista. Näitä ovat dikalsiumsilikaatti ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), trikalsiumsilikaatti ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), kalkki (CaO), wustiitti (FeO) ja dikalsiumferriitti ($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) /12, 34/. Teräskuonassa kalsium- ja magnesiumoksidit eivät ole täydellisesti sitoutuneet. Teräskuonan peruskomponentit ovat samat kuin heikossa portlandklinkkerissä /6, 7, 8, 9/.

2.6 Paisuminen

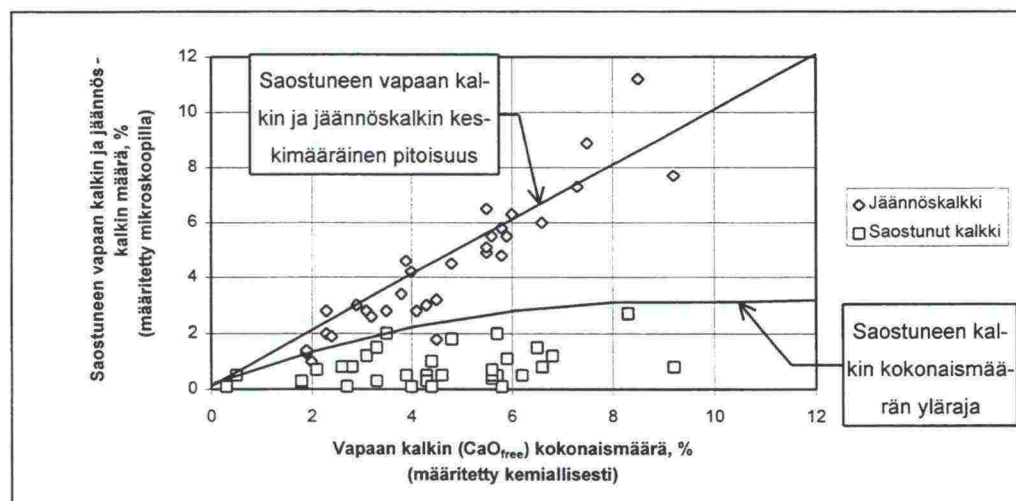
2.6.1 Paisumiseen vaikuttavat tekijät

Kosteuden vaikutuksesta teräskuonassa aiheutuu CaO :n hydratoitumista, jonka aiheuttavat merkittävä määrä vapaata CaO :a ja korkea CaO/SiO_2 -suhde. Reaktiotuotteena syntyvä kalsiumhydroksidi ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) on tilavuudeltaan suurempi kuin kalsiumoksidi ja tästä on seurauksena paisumista, jota mahdollinen vapaa magnesiumoksidi (MgO) voi lisätä.

Vapaa kalkki hydratoituu nopeasti ja voi aiheuttaa suuria tilavuuden muutoksia muutamassa viikossa. Magnesiumoksidi hydratoituu huomattavasti hitaammin ja aiheuttaa paisumista pitkällä aikavälillä /6, 7, 8, 9/. Voimakaimmin paisumisen määrään vaikuttavana tekijänä pidetään vapaan kalkin (CaO_{free}) määrää. Yleensä pitoisuutta alle 3 % CaO_{free} pidetään paisumattomana ja pitoisuutta yli 5 % CaO_{free} paisuvana /40/.

Yleiseurooppalaisena tavoitteena on asettaa rajat vapaan CaO :n ja MgO :n määriille sekä standardisoida nopeutettu koemenetelmä paisumisen testaamiseksi /43, 44/. Hyvin yleisesti suositeltu sallittu CaO_{free} -määrä tienrakennuksessa on luokkaa 3-7 %. Yleisin raja on noin 4 %. Kuitenkin tienrakennuksessa käytettävälle teräskuonalle on vaikea asettaa mitään ehdotonta rajaa vapaalle kalkille ja magnesiumoksidille, koska kuonan käyttö voi olla hyvin vaihtelevaa. Lisäksi korkeastakin vapaan kalkin määrästä aiheutuva paisuminen voidaan eliminoida rakenteellisilla seoksilla.

Saksassa on tutkittu vapaan kalkin ja huokoisuuden vaikutusta teräskuonan paisumiseen /52/. Tutkimuksen mukaan vapaa kalkki on teräskuonassa jäännöskalkkina sekä jähmettymisen ja myöhemmän jäähtymisen aikana saostuneena kalkkina. Jäännöskalkki on ylijäämäkalkkia, joka ei ole reagoi-
nut teräksen valmistusprosessissa. Huokoiset ja karkeat kalkkipartikkelit ovat jäännöskalkkia. Saostuneen kalkin määrä kasvaa samanaikaisesti kokonaiskalkkimäärän kanssa maksimiarvoonsa 3 % (kuva 2). Jäännöskalkin määrä toisaalta kasvaa korkeilla kalkkimäärillä keskimäärin lineaarisesti kokonaiskalkkimäärän kasvaessa. Toisin sanoen kuona, jolla on korkea vapaa kalkin pitoisuus, sisältää pääasiassa jäännöskalkkia.

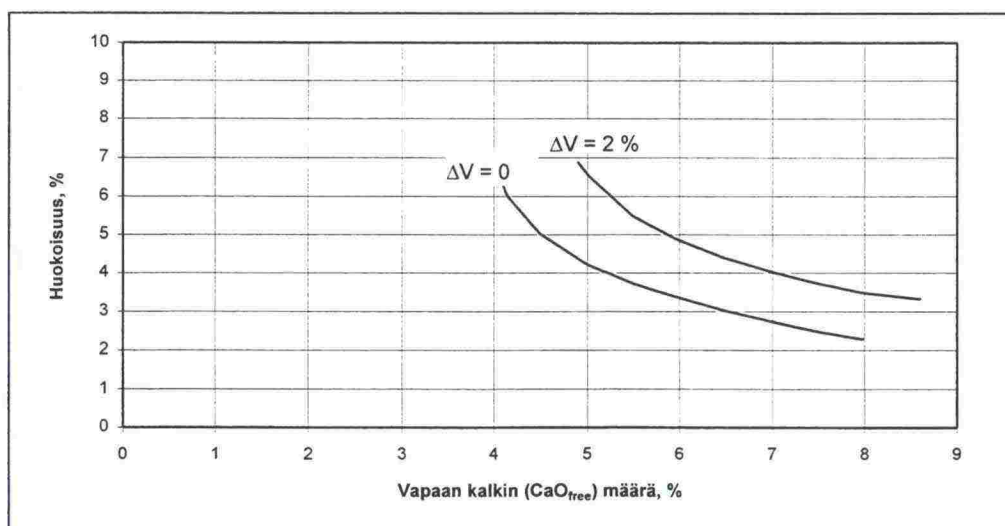


Kuva 2: Jäännöskalkin ja saostuneen kalkin määrät kokonaiskalkkimäärän funktiona /52/.

Samassa tutkimuksessa selvitettiin huokoisuutta uurretuista näytteistä elektronimikroskooppilla. Huokoisuus oli säröjen, halkeamien ja kanavien muodossa. Säröt johtuvat lämpöjännityksistä, mahdollisesti myös murskausprosessista. Kanavat voivat muodostua jähmettymisen aikana vapautuneen kaasun vaikutuksesta. Halkeamat ovat kutistumisen seurausta ja niitä muodostuu myös jähmettymisen aikana. Huokoisuus mitattiin elohopeahuokoisuusmittarilla. Mitatut huokoisuusarvot olivat välillä 2,5-8,5 % /52/.

Hydrataatio kuonarakeiden sisällä tapahtuu tutkimuksen mukaan seuraavalla tavalla: Vesihöyry (tai vesi) leviää rakeiden sisällä säröjä, halkeamia ja

kanavia pitkin. Se reagoi näiden huokosten sisällä olevan kalkin kanssa. Reaktiotuotteena syntyvä hydraatti kasvaa normaalisti huokosen vapaasta pinnasta. Kun se saavuttaa huokosen vastakkaisen pinnan, voima rasittaa huokosen (eli särön, halkeaman tai kanavan) kumpaakin pintaa aiheuttaen huokosen laajenemisen ja uuden huokosen syntymisen. Autoklaavikokeessa havaittiin (tulosten suuresta hajonnasta huolimatta), että suurilla vapaan kalkin määrillä ($> 4\%$) pintasäröilyn määrä kasvaa vapaan kalkin määrän ja huokoisuuden kasvaessa. Vapaan kalkin eri muodoilla ei näyttäisi olevan vaikutusta /52/. Kuvassa 3 on esitetty laboratoriokoekappaleille saatu tilavuuden muutos vapaan kalkin kokonaismäärän ja huokoisuuden funktiona /11, 52/.



Kuva 3: Tilavuuden muutos vapaan kalkin kokonaismäärän ja huokoisuuden funktiona /11, 52/.

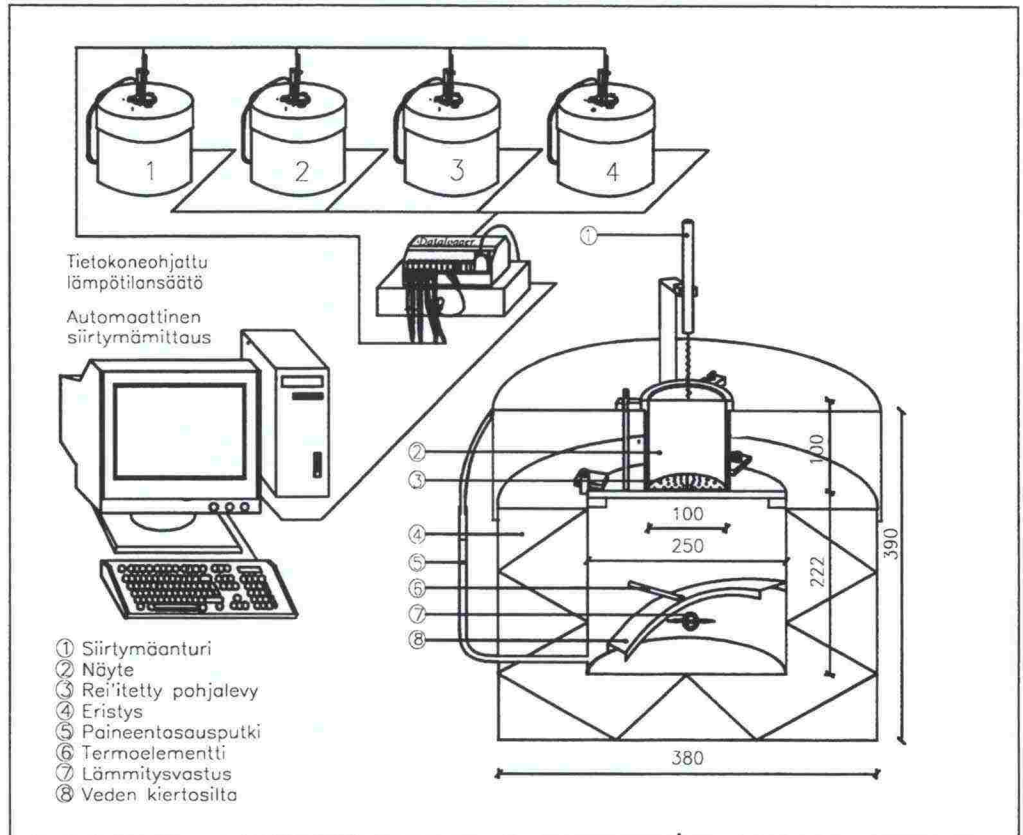
2.6.2 Paisuntatestit ja -laitteet

Teräskuonan tilavuuden muutosten tarkkailuun käytetään laboratorio-olosuhteisiin tarkoitettuja paisuntalaitteita. Laitteita ja menetelmiä on pääasiassa kolmea eri tyyppiä. Nämä ovat: 1) vesiupotukseen perustuvat, 2) paineistettuun höyryyn perustuvat ja 3) vesihöyryyn perustuvat laitteet.

Vesiupotukseen perustuvissa menetelmissä pohjasta rei'itettyyn muottiin valmistetaan yleensä proctor-sullonnalla näyte, joka muotteineen upotetaan lämpimään veteen. Upotuksen aikana mitataan pystysiirtymää /8, 9/. Koelämpötilat ja upotusajat vaihtelevat huomattavasti eri maissa. Mm. seuraavia koelämpötiloja on käytetty: $82 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $71 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $74 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja noin $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ /8, 9, 15, 29/. Upotusaika on luonnollisesti mahdollisimman lyhyt kokeen nopeutetusta luonteesta johtuen, yleensä 1-2 viikkoa. Paineistettuun höyryyn perustuvissa laitteissa menetelmän periaate on sama kuin upotuslaitteissakin. Niissä upotus korvataan vain näytteen alapäästä johdettavalla vesihöyrystypaineella /45/.

Vesihöyryyn perustuva paisunnan arviointimenetelmä on Saksassa kehitetty. Kyseistä menetelmää on esitetty Euroopan standardimenetelmäksi /12/. Menetelmässä näyte valmistetaan proctor-sullonnalla pohjasta rei'itettyyn muottiin, joka asetetaan vedellä täytetyn säiliön päälle. Veden lämpötila säiliössä on noin 100 °C. Kokeen aikana mitataan pystysiirtymää. Mittaustulokset tallennetaan suoraan mikrotietokoneelle. Kokeen kesto aika on noin vuorokausi, koska tässä ajassa tapahtuvan paisunnan perusteella voidaan määrittää tilastomatematisin keinoin lopullinen paisunta /30/.

Oulun yliopiston geotekniikan laboratorioon on valmistettu LD-teräskuonan tilavuuden muutosten tarkkailua varten laitteisto, jonka toimintaperiaate on samanlainen kuin Saksassa kehitetyssä laitteistossa. Geotekniikan laboratorion laitteisto koostuu neljästä yksiköstä (kuva 4). Lämpötila on kuhunkin yksikköön erikseen säädettävissä ja ohjaus on automatisoitu. Tilavuuden muutosten mittaaminen ja tallennus tapahtuu myös automaattisesti. Laitteisto on rakennettu siten, että sama muotti, jossa LD-kuonanäyte on, soveltuu käytettäväksi myös vedenläpäisevyys-, ilmanläpäisevyys- ja jäädytys-sulatuslaitteissa. Tällöin paisuntatarkasteluihin voidaan kiinteästi liittää myös muiden ominaisuuksien tutkimuksia ja ennenkaikkea paisunnan vaikutusta niihin. Muotti soveltuu sekä automaattiseen Proctor-vasaraan että ICT-kierto- tiivistyslaitteeseen, joten näyte voidaan valmistaa kummallakin laitteella.



Kuva 4: Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa oleva LD-teräskuonan paisuntalaitteisto.

2.6.3 Paisumisen hallinta

On esitetty, että paljon kalkkia sisältäviä ja siten paisuvia kuonia voi käyttää vain maataloudessa tai vähän liikennöidyillä teillä /48/. On kuitenkin muistettava, että paljon kalkkia sisältävän teräskuonan paisuminen ei ole tienrakentamisen kannalta ongelma, vaan se on hallittavissa monilla eri tavoilla. Seuraavassa esitetään lyhyesti muutamia.

Vanhentaminen

Teräskuonan vanhentamisella tarkoitetaan menetelmää, jossa kuona varastoidaan läjiin. Varastointi tapahtuu yleensä murskauksen jälkeen. Läjissä teräskuona on sään vaikutuksille alttiina, jolloin huomattava osa kuonassa olevasta vapaasta kalkista hydratoituu. Samoin tapahtuu magnesiumoksidin hydratoitumista. Tällä tavalla estetään paisuminen käyttökohteessa, esimerkiksi tiessä. Suositeltavaa on, että vanhentamisen jälkeen teräskuonaa ei enää käsitellä esimerkiksi murskaamalla, koska tällöin voi paljastua uusia vapaita kalkkipintoja, jotka alkavat hydratoitua. Vanhentamisaika on riippuvainen mm. alkuperäisestä vapaan kalkin määrästä, kuonan raekokojakaumasta, tulevasta käyttötarkoituksesta ja vanhennuslajien koosta.

Rakenteelliset ratkaisut (seokset)

Rakenteellisilla ratkaisuilla tarkoitetaan tienrakentamisessa käytettävän teräskuonan sekoittamista joko masuunikuonan, luonnonkiviaineksen tai molempien kanssa. Seoksissa paitsi eliminoidaan paisunta myös hyödynnetään teräskuonan suurta kalkkipitoisuutta. Esimerkiksi masuunihiekan kanssa sekoitteena teräskuonan kalkki toimii masuunihiekan hydrataatioreaktion herättäjänä ja nopeuttajana.

Prosessointi asfalttiseoksissa

Joissakin tutkimuksissa on esitetty, että käytettäessä alle 13 mm:n teräskuonalajitetta asfaltin runkoaineena, kuonaa ei tarvitse vanhentaa lainkaan /9, 37/. Asfalttiseoksen valmistaminen on nimittäin niin monivaiheinen prosessi kasteluineen, kuivatuksineen ja seulontoineen, että teräskuonassa tapahtuu välitön kalkin hydratoituminen käsittelyn aikana. Kun vielä lisäksi raakaiden ympärille tulee bitumikalvo, ei kosteus pääse enää vaikuttamaan ja hydratoitumista ei siten tapahdu. Joissakin maissa viranomaiset kuitenkin suosittelivat ainakin 30 vrk:n vanhentamista erityisesti karkeammille lajitteille (> 19 mm) /9/.

Happokäsittelyt

Happokäsittelyssä teräskuona pestään 12 %:lla rikkihapolla (H_2SO_4). Tällä menetelmällä ei ole kuitenkaan pitkäaikaisvaikutusta /6, 7, 8, 9, 37/.

Yhdistelmäratkaisut

Yhdistelmäratkaisuilla tarkoitetaan teräskuonan paisumisen eliminointia edellä mainittujen menetelmien yhdistelmillä. Esimerkiksi murskatun teräskuonan vanhentaminen ja sen jälkeinen happokäsittely ennen asfalttiseoksen valmistamista on tyypillinen yhdistelmäratkaisu. Käytännössä lähes kaikki tienrakennuksessa käytettävä teräskuona on prosessoitu paisumattomaksi ainakin jossain määrin yhdistelmäratkaisuilla (esim. murskaus → vanhentaminen).

Ilmavirtagranulointi (Blast granulation system)

Japanissa on kehitetty laitteisto teräskuonan nopeaan jäähdytykseen ilmavirralla. Ilmavirtagranuloinnissa kuljetusastiassa oleva sula kuona kaadetaan putkikanavaa pitkin, jonka poistoaukossa kuona puhalletaan suurinopeuksisella ilmavirralla pois, jolloin muodostuu pallomaisia rakeita. Lentävästä kuonasta säteilevä lämpö, lennon loputtua kuonarakeista johtuva lämpö ja puhallettavasta ilmasta johtuva lämpö otetaan käsittelyn aikana talteen. Ilmavirrassa jäähdytetyt kuonarakeet kasataan jähmettymisen jälkeen ja siirretään jatkokäsittelyyn /38/.

Penkassa jäähdytettyyn kuonaan verrattuna ilmavirralla jäähdytetyn kuonan Fe_3O_2 -pitoisuus on korkeampi ja FeO -pitoisuus alhaisempi. Paisuntakokeissa ilmavirralla jäähdytetty teräskuona on osoittautunut varsin stabiiliksi tilavuuden muutosten suhteen /38/.

Höyryvanhentaminen (Steam aging)

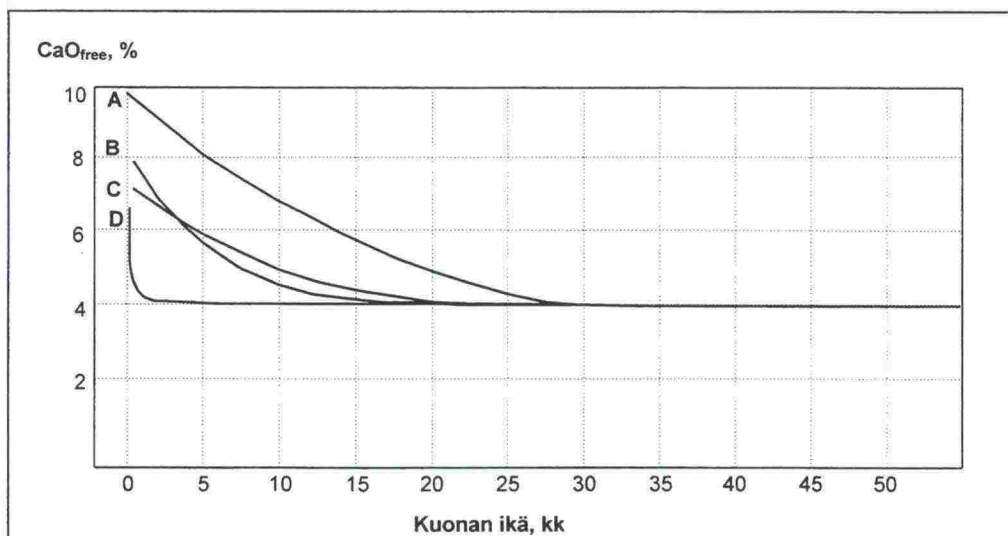
Myös höyryvanhentaminen on Japanissa kehitetty menetelmä. Siinä teräskuona kasataan luonnonmurskeen päälle. Murskeen sisällä on putkisto, josta höyry pääsee vaikuttamaan teräskuonaläjään /45/. Tätä menetelmää voisi kutsua nopeutetuksi vanhentamiseksi. Samalla periaatteella toimivat monet paisumisen testaamiseen kehitetyt laboratoriolaitteet.

Englannissa on tutkittu vanhentamisen vaikutusta hydratoitumattoman vapaan kalkin määrään /49/. Neljässä varastokasassa oli rakeisuudeltaan 0-20 mm teräskuonaa. Kasojen alkuperäinen CaO_{free} -pitoisuus oli noin 10, 8, 7.5 ja 6.5 %. Kaikissa kasoissa vapaan kalkin määrä putosi noin neljään prosenttiin. Vaadittava aika k.o. tason saavuttamiseen oli pitempi niillä kasoilla, joiden alkuperäinen vapaan kalkin määrä oli korkeampi. Aika vaihteli välillä 18-28 kuukautta (kuva 5) /49/.

Varastokasoissa, joissa oli 20-280 mm rakeita, hydratoitumattoman vapaan kalkin määrä putosi myös tietylle tasolle. Lopullinen vapaan kalkin määrä oli kuitenkin erisuuri kullekin varastokasalle vaihdellen välillä 3,7-5,5 % /49/.

Tutkimuksen mukaan on ilmeistä, että < 20 mm:n materiaali saadaan vanhennettua kokonaan vapaan kalkin määrän pudotessa 4 %:n tasolle, jonka jälkeen hydrataatiota ei enää tapahdu. Tähän vaadittava aika riippuu alkupe-
räisestä vapaan kalkin määrästä. Karkealle materiaalille sekä jäljellä oleva
vapaan kalkin määrä että vanhentamiseen vaadittava aika riippuvat alkupe-
räisestä vapaan kalkin määrästä /49/.

Yleisin ja samalla helpoin ja edullisin tapa prosessoida teräskuona paisumat-
tomaksi ennen käyttöä on vanhentaminen varastokasoissa. Lopullisessa
rakeisuudessaan ja oikean kokoisissa eli tarpeeksi pienissä varastokasoissa
riittävän pitkän ajan sään vaikutuksille alttiina ollut teräskuona on tarpeeksi
stabiili käytettäväksi tienrakennuksessa. Suomessa kaikki tienrakennukses-
sa käytettävä LD-teräskuona vanhennetaan varastokasoissa ennen käyttöä.



Kuva 5: Vapaan kalkin määrän muutokset neljässä varastokasassa ajan funk-
tiona /49/.

2.7 Lujittuminen

Masuunikuonan tavoin myöskin teräskuonalla on hydraulisia ominaisuuksia.
Se on toisin sanoen ajan myötä lujittuva materiaali. Mineraalikoostumuksel-
taan heikkoa portlandklinkkeriä vastaavana tuotteena mm. kiinalaiset käyt-
tävät teräskuonaa alhaislujussementtinä.

3 TERÄSKUONA TIERAKENTEES- SA

3.1 Kulutuskerrokset

Systemaattisinta teräskuonan käyttö on ollut päällysteseosten runkoaineena. Teräskuona-asfaltin voi suunnitella samoin kuin minkä tahansa muunkin seoksen. Ne muotoutuvat seokseksi, joka jäähdyytyään omaa hyvän vastuksen deformatumista vastaan. Teräskuona-asfalteilla saadaan aikaan myös hyvä kitka. Lisäksi niillä on erinomainen kyky vastustaa sideainemastiksien purkautumista. Teräskuona-asfalttiseoksilla on 15-20 % suurempi tilavuuspaino tavanomaisiin seoksiin verrattuna. Tästä on seurauksena suuremmat kuljetuskustannukset /8, 9, 22, 41/. Toisaalta teräskuona-asfaltit voidaan rakentaa useasti ohuemmiksi kuin tavanomaiset seokset /8/. Teräskuonaa on käytetty myös kuumissa seoksissa talvipaikkauksissa, koska sen on havaittu jäähtyvän hitaasti ja suuresta tilavuuspainosta johtuen paikkaukset pysyvät hyvin paikoillaan /10, 37/.

Nourelidin ja McDaniel /37/ ovat vertailleet asfalttiseoksia, jotka sisälsivät erilaisia määriä teräskuonaa ja luonnonhiekkaa. Näytteistä tutkittiin Marshall-lujuutta ja tehtiin epäsuora vetokoe. Lisäksi he tutkivat tyhjätilan määrää, mineraaliaineksen tyhjätilaa ja bitumilla täyttynyttä tyhjätilaa sekä tiheyttä. Tutkimuksessa oli kuusi eri seosta (taulukko 5). Luonnonhiekan ja teräskuonan yhdistelmänä tehty asfalttisekoite todettiin laboratorio-olosuhteissa hyväksi jäykkyydeltään ja kestävyydeltään. Suuri jäykkyyssmoduuli mahdollistaa ohuemman päällysteen rakentamisen. Lisäksi suuri jäykkyys mahdollistaa sen, että teräskuonaa voi käyttää yhdessä huokean tai huonolaatuisen hienon runkoaineen kanssa. Nämä puolestaan vähentävät kuljetuskustannuksia /37/.

Taulukko 5: Nourelidin ja McDanielin tutkimat luonnonhiekk - teräskuona - seokset /37/.

Seos	Teräskuonaa, %	Luonnonhiekkaa, %
1	100	0
2	87	13
3	73	27
4	59	41
5	47	53
6	40	60

Samassa tutkimuksessa /37/ selvitettiin myös noin kymmenen vuotta vanhojen teräskuonaa sisältävien asfalttipäällysteiden kuntoa. Paksuus päällysteissä oli 25 mm:stä vähän yli 30 mm:iin. Teillä havaittiin verkkohalkeilua ja valko-harmaita haalistumia näissä halkeamissa tai niiden lähellä. Nämä olivat samantyyppisiä kuin mitä laboratoriossa oli havaittu peräkkäisten jäädytys-sulatussyklien jälkeen. Kuitenkaan teissä ei havaittu minkäänlaista pur-

kautumista tai urautumista ja päällysteen pinta on säilyttänyt joustavuutensa 8 vuoden liikennesäilytyksen jälkeen. Verkkohalkeilu voi johtua iän myötä tapahtuneesta kovettumisesta, sään vaikutuksista ja asfalttipinnan kutistumisesta. Toinen tärkeä tekijä on mahdollinen asfalttisideaineen nopeutunut kovettuminen, jonka on aiheuttanut teräskuonassa olevat rautaoksidit (20-26 %) /37/.

Nourelidin ja McDaniel esittävät tutkimuksiinsa perustuen seuraavaa /37/:

- Paisumista voi kontrolloida ja hallita käyttämällä suhteellisen suuria sideainemääriä, jotta varmistetaan paksu asfalttisideainekerros teräskuonapartikkelien ympärillä ja täten vähennetään tai mahdollisesti estetään suora altistuminen kosteudelle. Toinen vaihtoehto on korvata teräskuonan hiekkalajitteen osuus luonnonhiekalla.
- Teräskuonarunkoaineuksessa olevat kahden ja kolmen arvoiset rautaoksidit voivat nopeuttaa asfalttisideaineen kovettumista päällysteseoksessa ja tästä syystä pahentaa päällysteen halkeilua alhaisessa lämpötilassa. Käyttämällä pehmeämpiä asfalteja on mahdollista vaihtoehtoisesti ehkäistä nopeutuneen kovettumisen tasoa.
- Peräkkäisten jäädytysten ja sulatusten vaikutus laboratoriolosuhteissa valmistetuille seoksille oli marginaalinen.

Nourelidin ja McDaniel toteavat, että on suositeltavaa korvata teräskuonan hiekkalajite luonnonhiekalla, suunnitella asfalttiseos hieman avoimeksi, käyttää optimiarvoja hieman korkeampia asfalttimääriä ja mahdollisesti käyttää pienennettyä suunnittelupaksuutta, jotta voidaan kompensoida valmistettujen seosten teräskuonasta aiheutuvaa suurta ominaispainoa, taipumusta kiihdyttää asfalttisideaineen kovettumista ja suhteellisen korkeita kustannuksia. Näiden suositusten mukaisesti valmistettujen päällysteseosten käyttäytyminen tulisi varmistaa todellisissa kenttäolosuhteissa /37/.

Suomen uusien asfalttinormien /2/ mukaan asfalttipäällysteen kiviainesta korvaavana raaka-aineena voidaan käyttää kuonamursketta. Sen käyttö ja laatuvaatimukset suunnitellaan tapauskohtaisesti. Asfalttinormeissa ei mainita, mistä kuonalaadusta murske on tehtävä. Joidenkin tutkijoiden mukaan optimaalisin käyttö teräskuonalle olisi nimenomaan runkoaineena asfalttibe-tonissa /9, 37/.

3.2 Rakennekerrokset

3.2.1 Sitomattomat rakennekerrokset

Kun teräskuonaa käytetään sitomattomissa rakennekerroksissa, on huomattava, että rakenteesta tulee ajan myötä puolijäykkä teräskuonan sitoutumisen vuoksi. Sitoutumista ei kuitenkaan yleensä huomioida mitoituksessa.

Saksassa on selvitetty eri tavoilla vanhentetun teräskuonan käyttöä tien rakennekerroksissa ilman sideaineita /30/. Tutkimuksessa selvitettiin paisu-

miskäyttäytymistä sekä laboratorio-olosuhteissa että koerakennuskohteessa. Laboratoriossa tehdyt paisuntakokeet tehtiin kohdassa 2.5.2 kuvatulla laitteella.

Tutkimukseen liittyen tehtiin neljä 100 metrin koerakennetta. Päälysrakenne koostuu 200 mm:n vahvuisesta jakavasta kerroksesta, joka toimii samalla routasuojauskerroksena. Tämän päällä on 200 mm:n vahvuinen kantava kerros ja yhteispaksuudeltaan 100 mm:n päällyste. Kerrokset rakennettiin 0-32 mm:n lajitteesta. Koeosuus 1 on kalkkikivistä tehty vertailuosuus. Koeosuus 2 rakennettiin LD-teräskuonasta, joka oli vanhennettu siten, että jakavan kerroksen kuonaa oli vanhennettu 5 kuukautta ja kantavan kerroksen kuonaa vastaavasti 7 kuukautta ennen rakentamista. Vapaata kalkkia siinä oli keskimäärin 4 % vanhentamisen jälkeen. Koeosuus 3 rakennettiin tuoreesta teräskuonasta (vanhennettu noin viikon), jossa oli vapaata kalkkia keskimäärin 7 %. Koeosuuden 4 teräskuona oli vanhennettu siten, että se oli noin viikon ajan ollut tehokkaassa vesikäsitelyssä. Koeosuuden 4 teräskuona oli eri tuotantolaitoksesta kuin koeosuuksien 2 ja 3 kuona /30/.

Taulukossa 6 on esitetty laboratoriossa paisuntalaitteella saatuja tilavuudenmuutoksia tutkituille kuonille eri vanhentamisaikojen jälkeen /30/. Näytteellä 2 voidaan havaita, että viiden ja seitsemän kuukauden vanhentamisajalla ei ole paljoa eroa tilavuudenmuutoksiin. Näytteellä 3 yhden ja kolmen kuukauden vanhentamisajassa on huomattava ero paisumisen suhteen. Näytteellä 4, joka oli eri laitoksesta kuin 2 ja 3, ei ole tapahtunut kovinkaan paljon paisumista eikä eroa paisumisessa yhden ja kolmen kuukauden vanhentamisella ole /30/.

Taulukko 6: Tilavuudenmuutoksia Saksassa tutkituille kuonille eri pituisten vanhentamisaikojen jälkeen /30/.

Näyte	Kerros	Vapaan kalkin määrä (%)	Vanhentamisaika (kk)	Tilavuuden kasvu (%)
2	jakava	4,3	5	2,0
	kantava		7	2,3
3	jakava	4,4	1	5,7
	kantava		3	2,0
4	jakava	7,2	1	1,9
	kantava		3	1,5

Vaikka tutkimuksessa saatiin kaikilla koetiekohteessa käytetyillä teräskuonilla laboratorio-olosuhteissa aikaan paisumista, joka tarkoittaa sitä, että kuonissa olisi vielä vapaata kalkkia, ei tiessä ole vastaavilla kuonilla tapahtunut minkäänlaista tilavuudenmuutosta kolmen vuoden aikana. Koerakenteiden poikkileikkausprofiilit olivat myös moitteettomat. Tutkimuksen mukaan kan-

tavassa kerroksessa ilman sideaineita voi käyttää teräskuonaa, jossa on vapaata kalkkia maksimissaan keskimäärin 4 % /30/. Laboratoriossa tehdyistä paisuntakokeista on huomattava, että näytteet sullottiin muottiin proctor-vasaralla, mikä voi aiheuttaa rakeiden hienonemista, josta puolestaan voi olla seurauksena uusien vapaiden kalkkipintojen paljastumista.

Thom ja Brown /47/ ovat tehneet kolmiaksaalikokeita erilaisilla kalkkikivillä, graniitilla, murskatulla betonilla, teräskuonalla, masuunin pohjatuhkalla, hiekkakivellä, soralla ja kahdella erilaisella hiekalla. Koestustapoja oli lukuisia erityyppisiä. Kimmomoduuliltaan teräskuona oli tutkituista materiaaleista toiseksi paras ja leikkauslujuudeltaan paras. Sen sijaan pysyvän deformaation vastustuskyky oli keskimääräistä heikompi /47/.

Krebs et al. ovat kokeilleet kantavuuden parantamista teräskuonilla, joiden vapaan kalkin määrät vaihtelivat välillä 3-9 %. Näillä kalkkipitoisuuksilla ei ollut mitään eroa eikä kuona ollut luonnonmateriaalia huonompaa /15, 20/. Australiassa on jakavassa kerroksessa käytetty teräskuonaa, jossa on ollut yli 63 mm:n rakeita. Käyttökohteina ovat olleet kunnalliset tiet ja moottoritiet sekä tehdasalueiden tiet /16/.

3.2.2 Sidotut rakennekerrokset

Sidotuilla (sitoutuvilla) rakennekerroksilla tarkoitetaan rakennetta, jossa hyödynnetään teräskuonan hydraulisuutta ja vapaan kalkin aktivoivaa vaikutusta. Kun käytetään teräskuonaa sidotussa (yleensä kantavassa) kerroksessa, pyritään siihen, että rakenteesta tulee puolijäykkä.

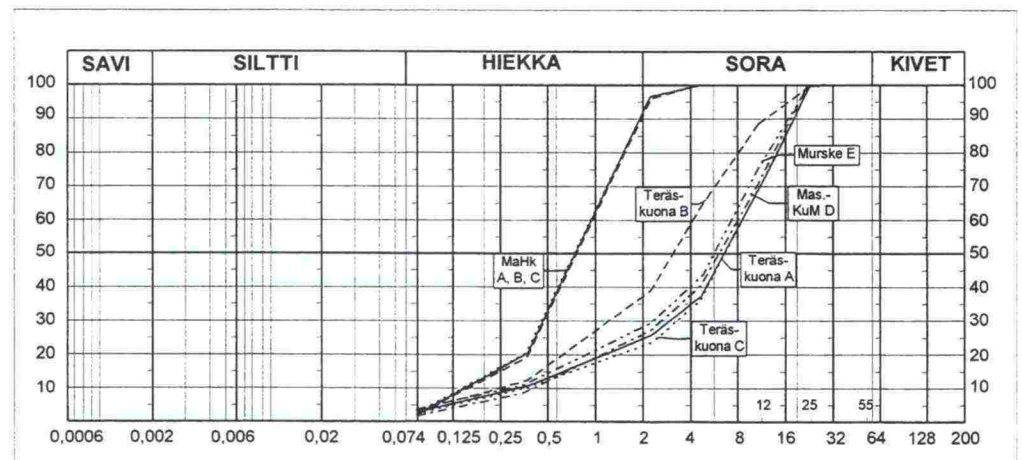
Hollannissa on käytetty tien kantavassa kerroksessa seosta, jossa on 60 % ilmajähdytettyä masuunikuonaa (0-60 mm), 25 % teräskuonaa (0-15 mm) ja 15 % granuloitua masuunikuonaa. Vapaan kalkin määrä teräskuonassa on ollut noin 2,5 %. Tästä seoksesta tehty kantava kerros on rakennettu tavanomaisin tienrakennusmenetelmin noin 10 %:n vesipitoisuudella. Kokeemukset ovat olleet erinomaisia ja seoksen käyttö onkin vakiintumassa /6, 7, 15, 37/.

Nomura ja Enokido /36/ ovat selvittäneet teräskuonan ominaisuuksia, teräskuonasta tehdyn kantavan kerroksen ominaisuuksia ja niiden muutoksia ajan suhteen sekä teräskuonan pitkän ajan stabiilisuutta kantavassa kerroksessa. Tutkimuksessa käytettiin kahdenlaisia rakenteita: pelkästä murskasta teräskuonasta tehty rakenne sekä murskatun teräskuonan, granuloidun masuunikuonan (masuunihiekan) ja kalkin seoksesta tehty rakenne (taulukko 7). Vertailumateriaaleina olivat masuunikuonamurske ja tavallinen kiviainesmurske /36/. Kuvassa 6 on esitetty kuonien ja murskeen rakeisuuskäyrät ja kuvassa 7 vastaavasti seosten rakeisuuskäyrät.

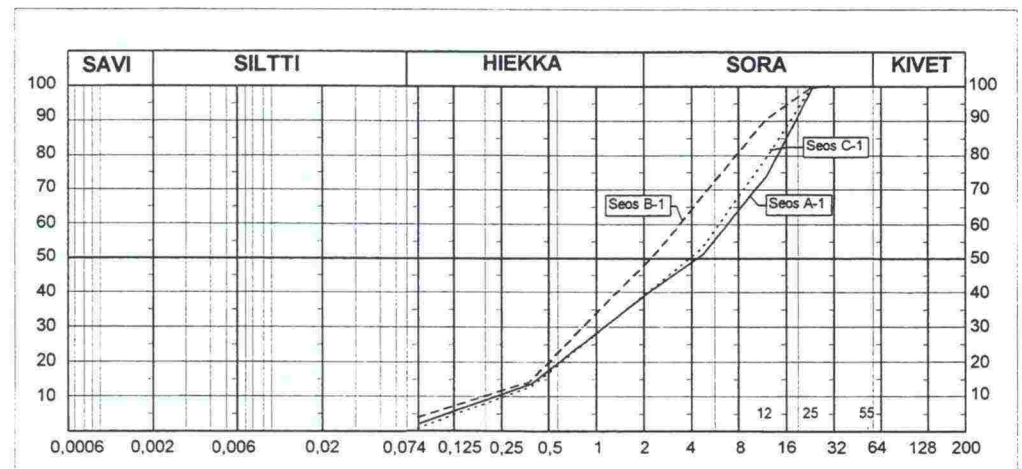
Kullakin kuonaseoksella tehtiin 5 metriä pitkä ja leveä koepätkä, jossa kuonakerroksen paksuus oli 250 mm. Päälysteenä oli 50 mm paksu teräskuona-asfalttibetoni, joka poistettiin aina mittauksen ajaksi.

Taulukko 7: Nomuran ja Enokidon tutkimien näytteiden koostumukset ja ominaisuuksia /36/.

Näyte / Ominaisuus	Teräskuona tuore		Teräskuona 3 kk		Teräskuona 6 kk		Masuuni- kuonaM.	Murske
	A-0	A-1	B-0	B-1	C-0	C-1	D	E
Teräskuona	100	80	100	80	100	80		
Masuunihiekka		18		18		18		
Kalkki		2		2		2		
MasuunikuonaM							100	
Murske								100
Til.paino [kg/l]	2,33	1,99	2,24	1,83	2,14	1,91	1,58	1,75
γ_d -max. [g/cm ³]	2,803	2,536	2,615	2,493	2,660	2,431	2,010	2,181
w - opt. [%]	5,2	8,5	7,3	8,7	5,7	9,2	10,2	7,1



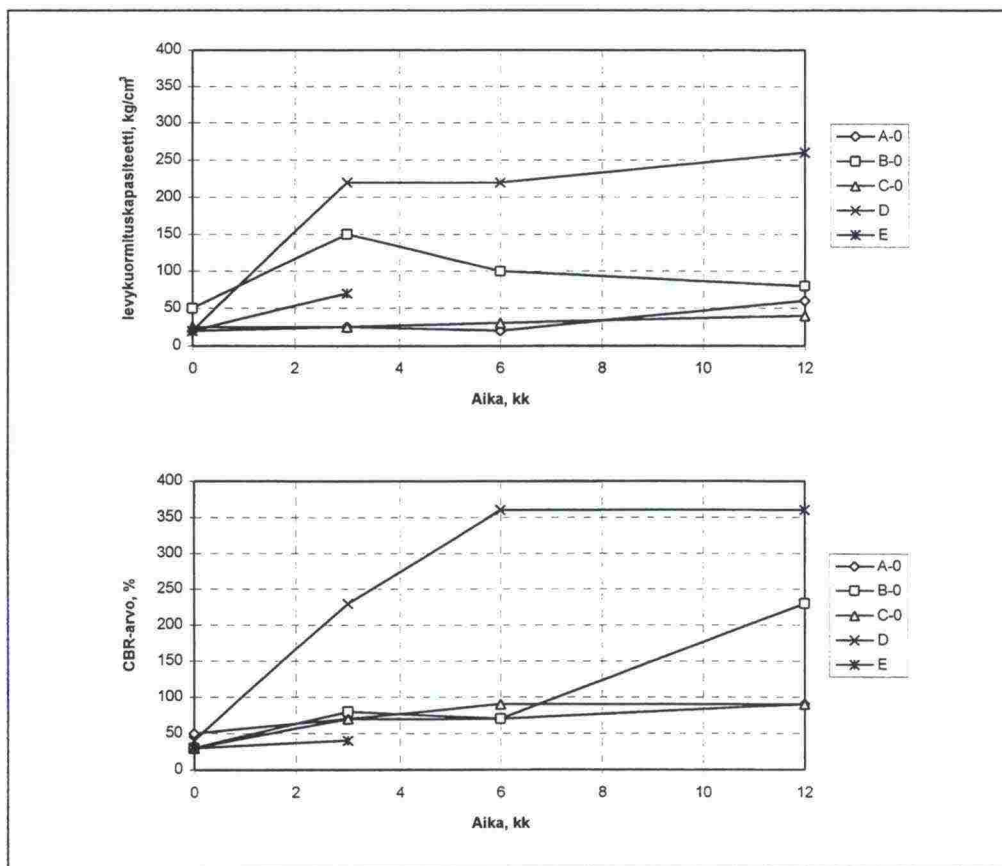
Kuva 6: Nomuran ja Enokidon tutkimuksessa käytettyjen kuonien ja murskeen rakeisuudet /36/.



Kuva 7: Nomuran ja Enokidon tutkimuksessa käytettyjen teräskuona - masuunihiekka - kalkki -seosten rakeisuuskäyrät /36/.

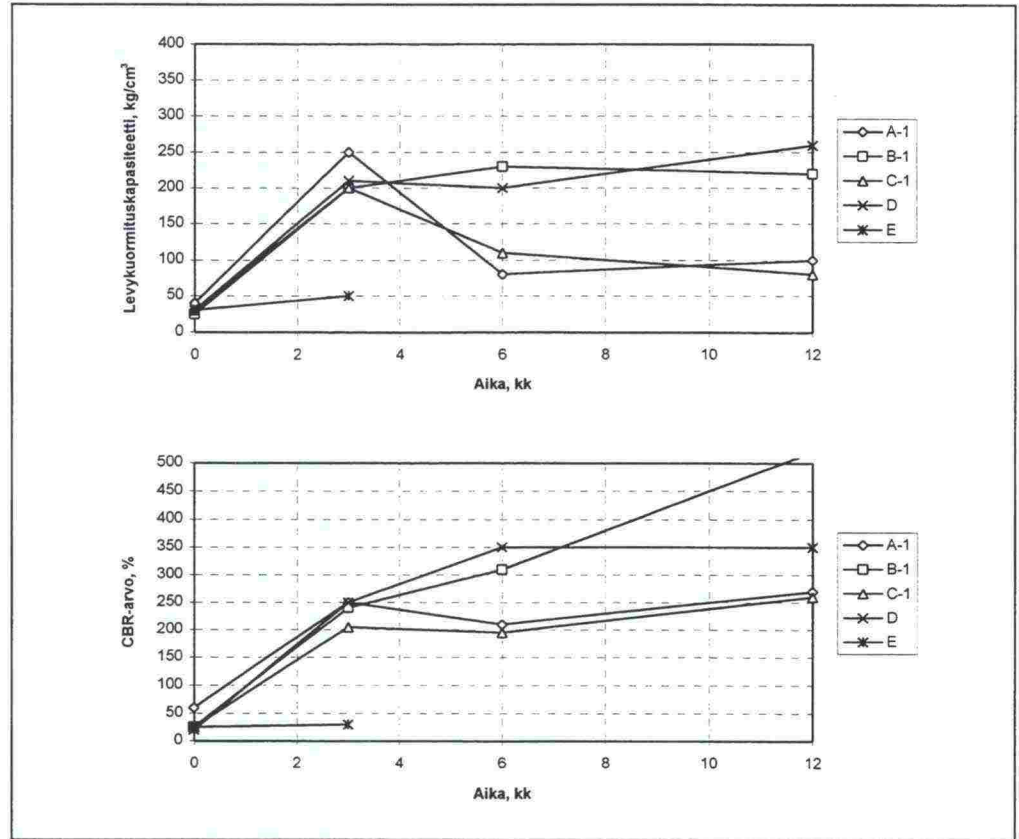
Teräskuonaseosrakenteessa olivat kantavuudet erittäin hyviä ja paranivat ajan myötä ollen verrattavissa masuunikuonamurskeen kantavuusarvoihin (kuvat 8 ja 9). Tämän arvellaan johtuvan muutoksesta raekokojakaumassa masuunihiekan lisäyksen vuoksi sekä teräskuonan hydraulisuuden lisääntymisenä masuunihiekan ja kalkin lisäyksen johdosta /36/.

Tilavuuden stabiilisuuden tutkimuksissa tiehen asennettiin mittauspisteitä, joista seurattiin kantavan kerroksen pystysiirtymiä. Paisumista tapahtui keskimäärin vain noin 0,3 mm vajaassa vuodessa eli käytännössä merkityksetömän vähän. Ainoastaan tuoreesta teräskuonasta tehdyissä rakenteissa oli havaittavissa enemmän paisumista, tällöinkin enimmillään 0,8 mm /36/.



Kuva 8: Teräskuonan kantavuuden ja CBR-arvon muutos ajan funktiona, lyhenteet taulukossa 7 /36/.

Tutkimuksessa todetaan vanhenneen (3 tai 6 kk) teräskuonan vastaavan fysikaalisilta ominaisuuksiltaan ja saavutettavilta kantavuuksiltaan masuunikuonamursketta. Masuunihiekan lisäyksen havaittiin parantavan ominaisuuksia johtuen raekokojakauman paranemisesta, masuunihiekkarakeiden särmikkyydestä ja hydrataatioreaktion voimistumisesta. Tierakenteesta 5,5 vuoden kuluttua otetusta näytteestä havaittiin, että merkittäviä vaurioita ei ollut /36/.



Kuva 9: Teräskuonaseoksien kantavuuden ja CBR-arvon muutos ajan funktiona, lyhenteet taulukossa 7 /36/.

Kokemukset teräskuonan käytöstä sidottuna rakenteena tien kantavassa kerroksessa ovat hyviä ja yleensä sitä pidetään erittäin suositeltavana tienrakennusmateriaalina. Päinvastaisiakin arvioita on kuitenkin esitetty. Belgialaiset Verhasselt ja Choquet /51/ tutkivat vähintään 9 kuukautta vanhennettua teräskuonaa tien kantavassa ja jakavassa kerroksessa. Heidän mukaansa teräskuonaa ei saisi käyttää sidotuissa jäykissä rakenteissa, koska niissä teräskuonan paisumisesta voi aiheutua suuria vahinkoja /51/. On kuitenkin huomattava, että belgialainen teräskuona sisältää keskimääräistä enemmän magnesiumoksidia eli pitkäaikaispaisuminen on runsasta. Lisäksi suositus koskee nimenomaan jätkeä rakenteita eikä puolijätkeä, joihin teräskuonilla olisi yleensä pyrittävä. Puolijätkeä rakenteen etuna on, että rakenne voi 'absorboida' osan mahdollisesta paisumisesta.

Verhasselt ja Choquet esittävät myös mielenkiintoisen tavan eliminoida mahdollista paisumista. Heidän mukaansa sitomattoman teräskuonakerroksen ja ylempien kerrosten väliin asennettu vähintään 150-200 mm vahva hiekkakerros eliminoi paisuntahaittoja. Paisumisesta aiheutuvat paineet 'haihdutetaan' hiekkakerrokseen ja teräskuonan kanssa kosketuksissa olevat hiekkapartikkelit voivat osittain täyttää halkeamat ja tyhjätilat, jotka ovat aiheutuneet teräskuonan paisumisesta. Vapaan kalkin enimmäismääräksi

he esittävät 4,5 % ja käytettävän teräskuonan maksimiraekooksi 20-25 mm /51/.

Bullen /3/ on tutkinut seuraavia kuonia ja kuonaseoksia: 1) ilmajäähdytetty masuunikuonamurske, 2) ilmajäähdytetyn masuunikuonan, granuloidun masuunikuonan ja kalkin seos sekä 3) ilmajäähdytetyn masuunikuonan, granuloidun masuunikuonan ja teräskuonan seos. Puristuslujuuskokeiden perusteella havaittiin, että ilmajäähdytetyn masuunikuonan, granuloidun masuunikuonan ja teräskuonan seos lujittui ajan myötä. Samoin kävi ilmajäähdytetyn masuunikuonan, granuloidun masuunikuonan ja kalkin seokselle. Optimaalisin seos lujittumisen suhteen kuonille osoittautui olevan 50 % ilmajäähdytettyä masuunikuonaa, 20 % granuloitua masuunikuonaa ja 30 % teräskuonaa /3/.

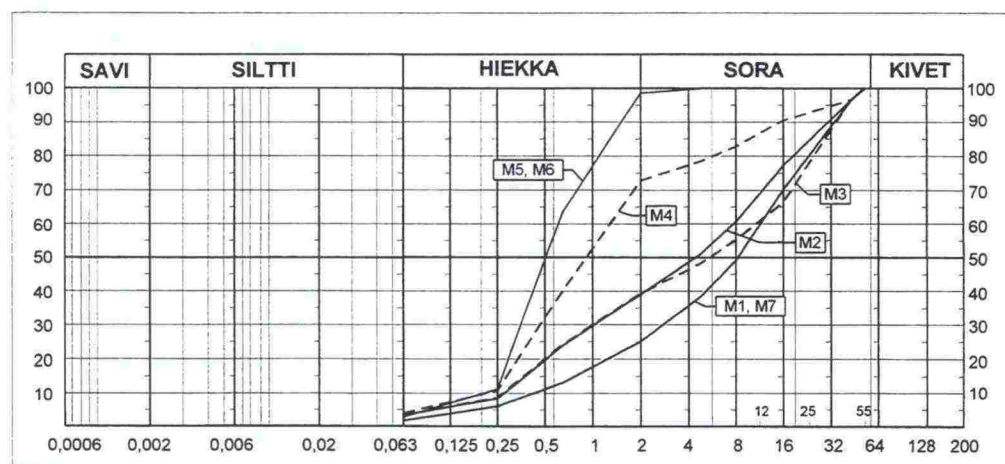
Dynaamiset kimmomoduulit Bullen määritti 50:20:30 -seokselle 7, 14, 28 ja 56 vuorokauden iässä. Ilmajäähdytetty masuunikuona-granuloitu masuunikuona-teräskuona -seos käyttäytyi samalla tavalla kuin seos, jossa oli 79 % ilmajäähdytettyä masuunikuonaa, 20 % granuloitua masuunikuonaa ja 1 % kalkkia. Tosin dynaamiset kimmomoduuli-arvot olivat hieman alempia. Teräskuonan vapaan kalkin pitoisuudeksi määritettiin 2,5 %, mikä tarkoittaa sitä, että koko seoksen kalkin määrä oli noin 0,75 % ja kyseinen kalkki oli huonosti jakautunut. Syitä teräskuonaseoksen alhaisempaan lujuuteen olivat edellä mainittu alempi kalkkipitoisuus ja kalkin epäsuotuisampi jakaantuminen. Tutkimuksessa havaittiin myös, että pelkkä ilmajäähdytetty masuunikuona käyttäytyy dynaamisissa kolmiakselialikokeissa selvästi sitoutumattoman materiaalin tavoin ja kuonaseokset puolestaan kuten puolijäykät stabiloidut materiaalit /3/.

Motz, Kohler ja Thomassen /19, 31/ selvittivät tutkimuksessaan taulukossa 8 esitetyjä seoksia. Tutkimusmateriaalien raekokojakaumat on esitetty kuvassa 10.

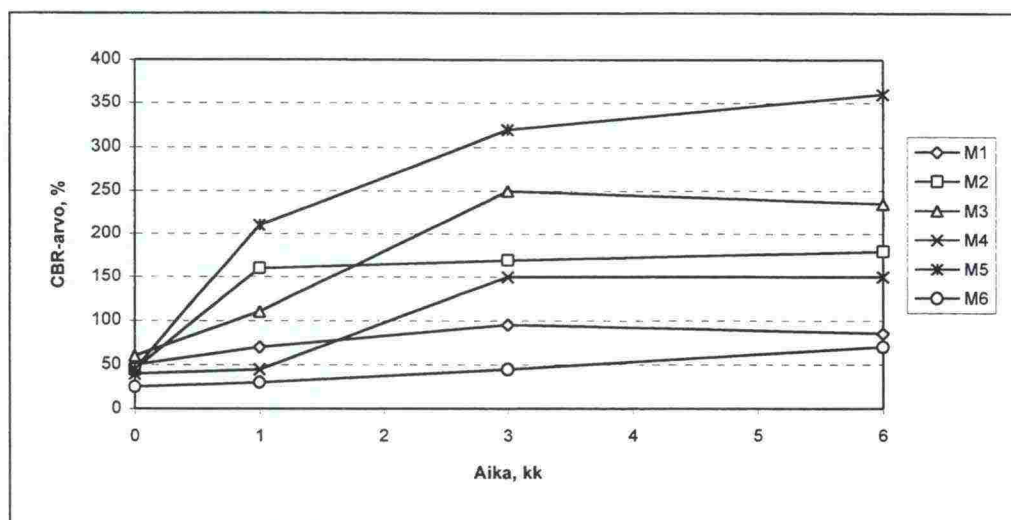
Laboratoriossa valmistettiin tutkittavista seoksista M1-M6 150 mm:n proctor-muotilla koekappaleet, joille määritettiin CBR-arvot 0, 28, 91 ja 180 vuorokauden säilytysajan jälkeen (kuva 11). Vertailtaessa seoksia M1-M3 on havaittavissa, että kun pelkästä masuunikuonamurskeesta korvataan 20 % masuunihiekalla (M3), paranee CBR-arvo huomattavasti. Kun muutetaan seosta siten, että masuunikuona-murskeesta korvataan 15 % masuunihiekalla ja 10 % LD-teräskuonalla (M2) paranee CBR-arvo edelleen jonkin verran. Parhaimmat CBR-arvot saatiin seoksella, jossa oli masuunihiekkaa 95 % ja aktivaattorina kalkkia 5 %. Huonoimmat CBR-arvot saatiin seokselle M6, jossa oli pelkkää masuunihiekkaa. Syy tähän on hyvin selvä: masuunihiekka ei ole puoleessa vuodessa ehtinyt sitoutua juuri laisinkaan /19, 31/.

Taulukko 8: Motzin, Kohlerin ja Thomassenin tutkimuksessa käytetyt seokset /19, 31/.

Materiaali	Seos						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Masuunikuonamurske 0-32 mm	100%	75%	80%				
Masuunikuonamurske 8-22 mm				20%			
Masuunihiekka 0-5 mm		15%	20%	70%	95%	100%	
LD-teräskuona 0-10 mm		10%		10%			
Kalkki					5%		
Rakennuspurkumassa							100%



Kuva 10: Motzin, Kohlerin ja Thomassenin tutkimuksessa käytettyjen seosten raekokojakaumat /31/.



Kuva 11: CBR-arvon kehitys ajan funktiona eri seoksille Motzin, Kohlerin ja Thomassenin tutkimuksessa /19/.

Samassa tutkimuksessa seoksista tehtiin tien eri rakenneluokan mukaisia rakenteita kolmelle eri koekohteelle. Yhdellä koetiekohteella tehtiin kantavuusmittauksia Benkelman-palkilla välittömästi rakentamisen jälkeen ja siitä noin neljän viikon välein. Kantavuusmittausten perusteella parhaita olivat kantavassa kerroksessa seokset M1 (100 % masuunihiekkaa) ja M4 (70 % masuunihiekkaa, 20 % masuunikuonamursketta 8-22 mm, 10 % LD-kuonaa 0-10 mm). Kantavassa kerroksessa parhaita rakenteita olivat lähtökantavuuksiltaan myöskin seokset M1 ja M4. Lisäksi tutkimuksessa todetaan, että erityisesti seos, jossa oli 70 % masuunihiekkaa, 10 % LD-teräskuonaa 0-10 mm ja 20 % masuunikuonamursketta 8-22 mm, toimi hyvin. Vaikka tässä seoksessa olikin korkea hiekkalajitteen määrä, se ei ole este tienrakennuskäyttöön /19, 31/.

Edellä mainittujen tyyppisiä tutkimuksia teräskuonan käytöstä on tehty lukuisia eri puolilla maailmaa. Choquet /4, 15/ on sekoittanut jauhettua teräskuonaa ($< 0,075$ mm) hiekkaan ja ilmoittaa vähäisestä lujuuden kasvusta. Hänen mielestään sitoutuminen on liian heikkoa. On ollut myös ajatuksia käyttää kalkkirikasta teräskuonaa aktivaattorina masuunihiekalle ranskalaisen grave-laitier'-tekniikan mukaan. Tavallisesti grave-laitier'-tekniikassa aktivoidaan vähäisellä kalkkimäärällä (noin 1 %) seosta, jossa on 15-20 % masuunihiekkaa ja loput luonnonkiviainesta. Kalkki on kaupallista laatua tai kalkki-kipsi -seosta. Panis /15, 39/ on sen sijaan lisännyt 5 % hienosta materiaalista teräskuonaa joko ilman kipsiä tai kipsin kanssa (2 %) aktivointiin seokseen, jossa on myös 15 % masuunihiekkaa.

Australiassa on kokeiltu seosta, jossa oli masuunikuonamursketta 50 %, masuunihiekkaa 20 % ja teräskuonaa 30 %. Tulokset tästä seoksesta ovat hyviä /15/. Lisäksi on kokeiltu seosta, jossa on teräskuonaa 40 % ja masuunihiekkaa 60 %. Seoksessa teräskuona toimii kalkin lähteenä ja on siten masuunihiekan aktivaattorina. Puristuslujuudet 90 vrk:n iässä olivat luokkaa 5 MPa /22/. Japanissa /35/ puolestaan on kokeiltu seosta, jossa oli teräskuonaa 50 %, masuunikuonamursketta 30 % ja masuunihiekkaa 20 % kantavassa kerroksessa. Vertailuna oli masuunihiekka ja luonnonmateriaali. Parhaiten rakenteessa toimi kuonaseos.

Englannissa on kokeiltu masuunikuonamurske-masuunihiekka-teräskuona -seosta /15, 17/. Näiden laboratoriotutkimusten mukaan 23-28 % teräskuonaa on optimi. Tätä suuremmilla määrillä on vähäinen vaikutus sitoutumiseen ja ne vaikuttavat kuljetuskustannuksiin teräskuonan suuren painon vuoksi. Kipsiaktivointi parantaa sitoutumista ja vähäinen määrä kalkkia jopa nopeuttaa sitä.

Japanissa /50/ on kokeiltu seuraavia masuunihiekka (0-5 mm) - jauhettu teräskuona (0-5 mm) seossuhteita tienrakennusmateriaalina: 60:40, 40:60 ja 20:80. Lisäksi tutkittiin 100 %:sta teräskuonaa. Tulosten mukaan masuunihiekan lisäys teräskuonaan kasvatti lujuutta ja vähensi paisuntaa veteenuppo-

tustestissä. Tiivistetyt kuonaseokset täyttivät täysin lujuudelle ja kestävyydelle asetetut vaatimukset käytettäessä niitä tien kantavassa kerroksessa.

3.3 Penkereet ja täytöt

Kun teräskuonan stabiilisuudelle tilavuuden suhteen ei ole välttämätöntä asettaa rajoja, käytetään sitä mm. penkereissä ja täytöissä sekä maisemointitoissa /12/. On kuitenkin muistettava, että näin massiivinen käyttö ei ole teräskuonan ominaisuuksien hyödyntämistä, vaan lähinnä läjitystä.

3.4 Massa- ja syvästabilointi

Massa- ja syvästabiloinnissa teräskuonan käyttö on kokeiluluonteisestikin ollut vähäistä. Syvästabiloinnissa on kokeiltu menetelmää, jossa teräskuonan hienoainesta käytetään masuunihiekan aktivoinnissa. Kagawamuran /18/ mukaan joko jauhettu teräskuona tai myös hienoaines voi olla sopivaa tähän käyttöön. On havaittu, että teräskuonan hienoaines (raekoko 0,3 - 0,5 mm) voi olla vaikutuksiltaan tähän tarkoitukseen hyvä. Laboratoriokokeissa kuonan ja kalkin seos antoi parempia tuloksia kuin pelkkä kalkki. Dauben /5, 15/ mielestä teräskuona (< 1,2 mm lajite) aktivoituna 5-20 %:lla kipsiä vaikuttaa hyvältä maastabilointiin.

4 LD-TERÄSKUONA SUOMEN TIENRAKENNUKSESSA

4.1 Laboratoriotutkimukset

Suomessa ei LD-teräskuonan ominaisuuksia rakennekerrosmateriaalina ole laboratoriossa juurikaan tutkittu. Kokemukset ovat tulleet lähinnä joistakin koerakennuskohteista.

Suomessa tuotettavasta LD-teräskuonasta on mennyt vuosittain läjitykseen noin kolmannes. Tämän vuoksi on siihen liittyvää tutkimustoimintaa voimakkaasti lisätty. Tutkimuksien pääasialliset rahoittajat ovat SKJ Yhtiöt Oy ja TEKES. Myös Rautaruukki Oy, Tielaitoksen geokeskuksen Oulun kehitysyksikkö ja Oulun tiepiiri osallistuvat tutkimuksiin.

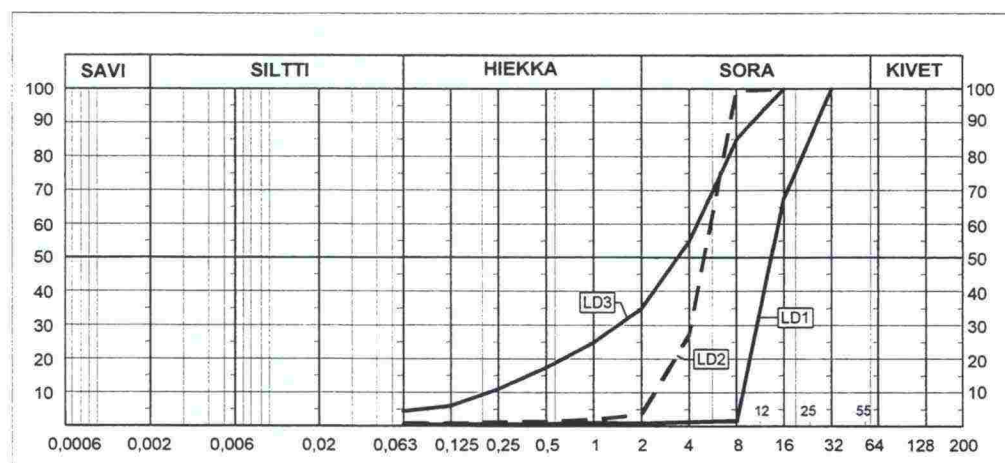
Tutkimusta suoritetaan kolmella eri painopistealueella Raahen LD-teräskuonalla. Nämä ovat: 1) LD-teräskuonan käyttö massiivirakenteena luonnonkiviaineksen ja ilmajäähdytetyn masuunikuonan korvaajana, 2) LD-teräskuonan käyttö kuonaseoksissa ja kuona-luonnonkiviainesseoksissa ja 3) LD-teräskuonan käyttö kuonasideaineissa tien rakennekerrosten stabiloidinnissa. LD-teräskuonan käyttöä koskevissa tutkimuksissa lähtökohtana on kuonatuotannon ylijäämät. Toisin sanoen tutkimus painottuu niihin kuonajätteisiin, jotka menevät tällä hetkellä läjitykseen.

Massiivikäyttöä koskevassa tutkimuskokonaisuudessa (painopistealue 1) selvitetään rakeisuudeltaan 0-20 mm:n LD-teräskuonan teknisiä ominaisuuksia. Kuonasta on poistettu maataloudelle kalkitukseen menevä lajite (0-3 mm). Ennen tutkimuskokonaisuuden aloitusta tehtiin esiselvityksiä, jotta saataisiin alustavaa tietoa siitä, miltä pohjalta LD-teräskuonaa olisi tutkittava.

Esiselvityksiin valittiin kolme rakeisuudeltaan erilaista LD-kuonaa /33/. Näyte LD1 oli noin vuoden vanhaa kuonaa, joka on murskattu 1994-95 vaihteessa ja seulottu kesällä 1995 asfaltin runkoaineeksi. Näyte LD2 oli 2-3 vuotta vanhaa, syksyllä 1994 murskattua kuonaa, josta on poistettu asfaltin runkoaines ja maatalouslajite. Aiemmin tämä lajite LD-teräskuonasta on palautettu prosessiin. Näyte LD3 oli näytteen LD1 alapäätä, josta on maatalouslajite poistettu. Tutkimusmateriaalien raekokojakaumat on esitetty kuvassa 12.

Esiselvitysten perusteella havaittiin LD-teräskuonan olevan masuunikuonaan verrattuna reaktiivisempaa. Kahden kuukauden koestusiässä LD-kuonan puristuslujuus oli noin 1,8 MPa. Näin suureen lujuuteen ei aktivoimattomalla masuunihiekalla päästä samassa ajassa. Taulukossa 9 on esitetty LD-kuonalle laboratoriossa määritettyjä teknisiä ominaisuuksia. Suomen tienrakennuksen kannalta merkittävä tulos on se, että LD-kuonan ja masuunikuonan lämmönjohtavuudet ovat samaa suuruusluokkaa /33/.

Esiselvitysten perusteella LD-teräskuona näyttäisi olevan ilmajäähdytetyn masuunikuonan kaltainen tienrakennusmateriaalina. Huomattavasti suuremmasta painosta voi olla haittaa kuljetuskustannuksien kannalta. Reaktiivisempaa materiaalina LD-kuonaa todennäköisesti tarvitsee vähemmän kuin masuunikuonaa, kun pyritään johonkin tiettyyn mitoituskantavuuteen. LD-teräskuonan käytössä on luonnollisesti huomioitava mahdollinen paisuminen.



Kuva 12: Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa tehdyissä esiselvityksissä käytettyjen LD-teräskuonien raekokojakaumat /33/.

Taulukko 9: Esiselvityksissä tutkittujen LD-teräskuonien teknisiä ominaisuuksia. Vertailumateriaaleina ovat masuunikuonamurske ja graniittimurske /33/.

Ominaisuus	LD1	LD2	LD3	MaKu	Graniitti
Optimivesipitoisuus, p-%	8,4	-	-	n. 8	n. 6
CaO _{free} , %	7,5	6,2	5,5*	-	-
Irtotiheys (löyhä), t/m ³	1,59	1,44	1,83	1,35-1,45	1,5
Kiintotiheys, t/m ³	3,49	3,46	3,45	2,78-2,84	2,6-2,7
CBR-arvo	112	-	240	145	180
Lämmönjohtavuus, W/mK					
kuiva, +22 °C	-	0,13	0,29	0,35	1,0
kyllästynyt, -10 °C	-	2,09	1,16	0,8-1,3	2,3

* CaO_{free} oli 3,3 % paisuntakokeen jälkeen (paisunta = 5,8 %)

Painopistealueiden 2 ja 3 tutkimuksissa pyritään LD-teräskuonan jalostetumpaan käyttöön. Tutkimuskokonaisuuden lopputuloksena saadaan mitoituspärametrit kuonaseoksesta valmistetulle tien rakennekerrokselle ja kuonasideaineella stabiloidulle tien rakennekerrokselle. Mitoituspärametrien määrittäminen tapahtuu kuormituskestävyyden ja routakestävyyden suhteen.

Seosten ja sideaineiden tutkimuksissa pyritään

- kehittämään teknisiä ominaisuuksia siten, että ne ovat seoksella ja stabiloidulla materiaalilla vähintään yhtä hyviä kuin yksittäisellä kuonatuotteella tai luonnonkiviaineksella,
- kuonassa mahdollisesti olevan käyttöä rajoittavan tekijän eliminointiin,
- kuonien ominaisuuksien toisiaan täydentämiseen ja
- kustannussäästöihin tienrakentamisessa.

Kuonaseoksien kehittämisessä käytettäviä kuonatuotteita ovat masuunihiekkä, valssimurskattu granuli, LD-teräskuona, rikinpoistokuona ja teräsenkkakuona. Seoksien kehittämiseen kuuluvat myös kuona-luonnonkiviaines -seokset. LD-teräskuona on rakeisuudeltaan yleensä yli 3 mm. Lähtökohtana on LD-kuona, josta on poistettu maatalouslajite (0-3 mm) ja LD-kuona, josta on poistettu maatalouslajitteen lisäksi asfaltin runkoaines (10-20 mm).

Kuonasideaineiden tutkimuksissa käytettäviä kuonatuotteita ovat masuunihiekkä, valssimurskattu granuli, kuonajauhe ($400 \text{ m}^2/\text{kg}$, Blaine) , LD-teräskuona (0-3 mm), valssimurskattu LD-kuona, jauhettu LD-kuona ($150 \text{ m}^2/\text{kg}$ Blaine) ja sementti. Sideainetutkimuksissa pyritään siihen, että aktiivaattorina käytettävä sementti saataisiin mahdollisimman monessa tapauksessa korvattua LD-teräskuonalla. Tutkimuksissa selvitetään myös pelkän LD-teräskuonan sideaineominaisuuksia. Sideainetutkimusten ensimmäisessä vaiheessa kehitetään reaktiivisimmat kuonasideaineet. Toisessa vaiheessa suoritetaan sideaineiden seossuhteiden säätö stabiloitavasta luonnonkiviaineksesta riippuen.

Yksi keskeinen osa LD-teräskuonaan liittyvissä tutkimuksissa on paisuntaominaisuuksien selvittäminen ja ennenkaikkea se, miten mahdolliset tilavuudenmuutokset on hallittavissa. Ensisijaisesti pyritään siihen, että stabiilisuus saadaan aikaan rakenteellisin ratkaisuin. Tällöin tulevat kysymykseen mm. edellä mainitut kuonaseokset ja kuona-luonnonkiviainesseokset.

4.2 Koerakenteet

Varhaisimmat seurannan kohteena olleet koerakenteet on tehty Koverharin LD-teräskuonalla Kt 52:lla. Koerakenteet tehtiin vuonna 1976 ja niissä käytettiin 0-60 mm:n LD-teräskuonamursketta. Koerakenteet ovat edelleen hyvässä kunnossa. Oulun tiepiirin alueella on tehty erilaisia kuonakokeiluja useissa eri kohteissa, mm. Pt 18149:llä välillä Alavieska-Someronkylä ja Pt 18323:lla välillä Haapavesi-Pirnesjärvi. Päälystekäyttöä koskien tehtiin Vt 3:lle Nurmijärvelle päälystekoetie 1970-luvun lopulla.

Seuraavassa tarkastellaan lyhyesti kahden koerakennuskohteen, Vt 3:n päälystekoetien ja Pt 18323:n tuloksia.

Vt 3, Nurmijärven päällystekoetie

Vuonna 1979 rakennettiin Nurmijärvelle Vt 3:lle koeosuuksia erilaisista asfalttiseoksista. Yhtenä tarkastelun kohteena oli LD-teräskuonan (0-20 mm) soveltuvuus asfalttipäällysteen runkoaineeksi. Vertailupäällysteen täytejauheena oli tavanomainen kalkkikivijauhe ja runkoaineena murskesora (0-20 mm) ja sepeli (12-20 mm). Bitumilajina oli B-120 /24/.

Tutkimustulosten mukaan LD-teräskuonan käyttö päällysteen runkoaineena vähensi kulumista 29 % vertailupäällysteeseen nähden. Kuitenkaan teräskuonan lujuus ja se, että massassa käytettiin 15 % 12-20 mm sepeliä, eivät selitä kulumiskestävyyden paranemista. Kulumisero johtuukin kuonarakeen mekaanisista tartuntaominaisuuksista. Sideaineen tunkeutuessa osittain huokoisen kuonarakeen sisälle pysyvät pienetkin kuonarakeet hyvin tien pinnassa kiinni. Päällyste on tällöin varsin sileä /24/.

Teräskuonan huokoisuudesta ja rosoisesta pintarakenteesta sekä emäksisyydestä johtuen sideaineen tarve on hieman 'normaalia' suurempi. Tyhjätilojen määrä on teräskuonapäällysteissä ollut tavanomaisia päällystemassoja suurempi. Tyhjätiloilla on vaikutusta päällystemassojen säänkestävyyteen. Tyhjätilaan voidaan vaikuttaa bitumin lisäyksellä. Teräskuonapäällysteiden tiheys on tavanomaisia asfalttipäällysteitä suurempi. Tästä on seurauksena se, että jos pyritään tiettyyn laatan paksuuteen, on teräskuonapäällysteiden massamäärän (kg/m^3) oltava suurempi kuin tavanomaisissa massoissa /1/.

Tutkimuksessa saatujen Marshall-tulosten mukaan teräskuonan deformaation kestävyys on hyvä. Myös teräskuonien raemuoto tukee tätä tulosta /1/. Lähteissä /25, 26, 27, 28/ esitettyjen kenttäkokeiden mukaan teräskuona soveltuu hyvin asfalttibetonin runkoaineeksi. Sen kestävyys on ollut yhtä hyvä tai parempi kuin murskeesta valmistettujen vertailupäällysteiden kestävyys.

Pt 18323, Haapavesi - Pirnesjärvi

Pt 18323:n parannushanke toteutettiin syksyllä 1990. Tien kantavaan kerrokseen tehtiin mm. kuvassa 13 esitettävät koeosuudet. Päällysteeksi tuli 50 mm:n kerros öljysoraa. Teräskuonamurske (TeKuM) oli raekokojakaumaltaan 0-4 mm, masuunikuonamurske 0-4 mm, valssimurskattu granuli (Vagr) 0-1 mm ja soramurske 0-64 mm. Kalliomurske oli rakenteessa 1 välillä 0-85 mm ja rakenteessa 4 vastaavasti 0-64 mm /21, 42/.

Rakenne 1		Rakenne 2		Rakenne 3		Rakenne 4	
KaM	85%	SrM	90%	SrM	85%	KaM	90%
MaKuM	20%	Vagr	5%	Vagr	5%	Vagr	10%
		TeKuM	5%	TeKuM	10%		

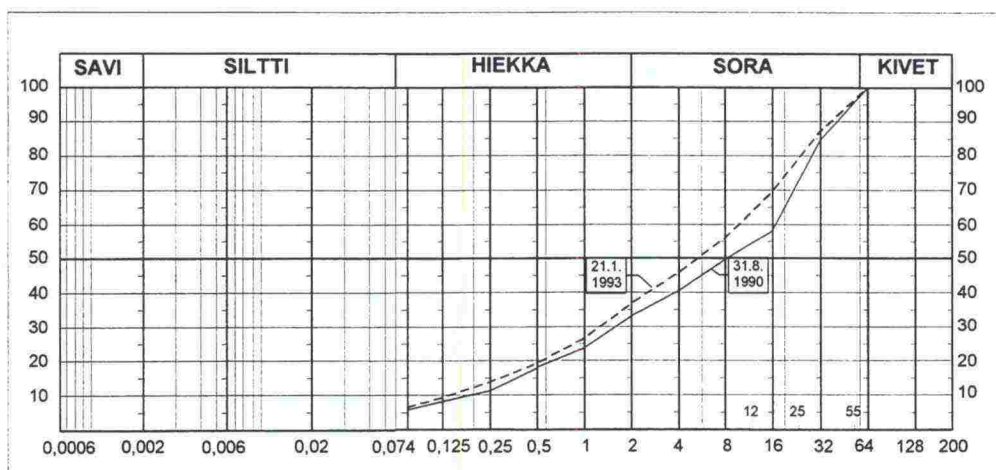
Kuva 13: Pt 18323 koeosuudet /21, 42/.

Rakentamisen aikana tehtiin valvontakoe-kappaleita sekoitetusta massasta proctor-sullonnalla puristuskoetta varten. Lujustuloksia huoneenlämmössä säilytetyille koe-kappaleille on esitetty taulukossa 10 /21, 42/. Koe-kappaleiden puristuslujuuksia on pidettävä kohtalaisen huonoina kaikilla rakennemateriaaleilla. Tuloksista voi kuitenkin havaita, että hidasta lujittumista on alkanut tapahtua. Lujittumisen hitaus johtuu ilmeisesti siitä, että kuonatuotteita on käytetty tutkittavissa seoksissa kohtalaisen vähän ja ilman varsinaista aktivaattoria. Parhaimmat loppulujuudet on rakenteen 3 seoksella, jossa teräskuonasta vapautuva kalkki on voinut jonkin verran aktivoida hydrataatio-reaktiota.

Taulukko 10: Pt 18323 valvontakoe-kappaleiden eri-ikäiset puristuslujuudet /21, 42/.

Rakenne	Puristuslujuus, MPa		
	28 vrk	91 vrk	180 vrk
1	0,55	0,75	1,05
2	0,25	0,4	1,05
3	hajosi	0,5	1,65
4	0,25	0,25	1,0

Raution /42/ suorittamissa rakeisuustutkimuksissa todettiin rakenteen 1 olevan 2,5 vuotta rakentamisen jälkeen heikoimmin sitoutunut ja rakenteen 4 parhaiten. Kuvassa 14 on rakenteen 2 raekokojakaumat rakentamisajalta ja vuonna 1993 otetuista näytteistä. Käyristä on havaittavissa sitoutumisesta johtuvaa raekokojen suurenemista. Näytteet yritettiin ottaa poraamalla, mutta yhdestäkään neljästä koerakenteesta ei saatu ehjiä kappaleita /42/.



Kuva 14: Pt 18323 työnaikaiset ja vuonna 1993 otettujen näytteiden rakeisuuskäyrät /21, 42/.

Kantavuusmittauksia on tehty ennen rakentamista ja välittömästi sen jälkeen sekä heinäkuussa 1992 (taulukko 11). Mittaukset on tehty levykuormituslaitteella. Kantavuudet ovat parantuneet rakentamisen seurauksena kahdessa

vuodessa noin 55-75 % rakenteesta riippuen. Rakenteen 2, jonka todetaan olevan kaikista tasaisin, kantavuuden parannus on ollut 65 % /42/.

Taulukko 11: Keskimääräisiä kantavuuksia Pt 18323:lta levykuormituslaitteella mitattuna /21, 42/.

Rakenne	Kantavuus, MPa				
	14.8.-90	6.9.-90	11.9.-90	18.9.-90	21.7.-92
1	139*	160	180	-	195
2	148*	137	175	183	227
3	140*	106	142	184	188
4	138*	109	140	169	244
* Ennen rakentamista					

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Teräskuona on materiaali, jonka käyttö tienrakennuksessa on ollut päällystemassoja lukuunottamatta lähinnä kokeiluluonteista. Syynä tähän lienee se, että teräskuonaa on vieroksuttu hallitsemattomasta käytöstä aiheutuneiden paisumisominaisuuksien vuoksi. Toisaalta on käytettävissä ollut ominaisuuksiltaan hyvin paljon samantyyppinen masuunikuona, joka on lisäksi stabiilimpi. Myös luonnonmateriaaleja on ollut kohtalaisesti saatavilla. Kuitenkin luonnonmateriaalien yhä vaikeampi saatavuus ja teräskuonalla suoritetuista tutkimuksista saadut hyvät tulokset ovat lisänneet mielenkiintoa tätä materiaalia kohtaan.

Monissa tutkimuksissa on keskitytty nimenomaan vapaasta kalkista aiheutuvan paisumisen vaikutusten selvittämiseen tienrakennuksessa. Lukuisten paisumisominaisuuksia käsittelevien tutkimusten vuoksi paisuminen ja siihen vaikuttavat tekijät on hyvin tiedossa. Pelkkiin laboratoriokokeisiin perustuvissa tutkimuksissa teräskuonasta saa 'yliaktiivisen' käsityksen ja tulokset esimerkiksi paisunnan suhteen ovat liian suuret. Samoin sitoutuminen voi laboratorio-olosuhteissa olla huomattavasti suurempaa kuin kentällä. Sama asia pätee luonnollisesti masuunikuonankin sitoutumiselle, mutta teräskuona vaikuttaisi tässä suhteessa olevan masuunikuonaa aktiivisempi materiaali.

Suosittelavin maksimiraekoko sekä rakennekerroksissa että päällysteissä näyttäisi olevan 20-25 mm. Optimaalinen vanhentamisaika on riippuvainen käyttökohteesta, rakeisuudesta, varastoimis- ja jatkokäsittelytavasta sekä alkuperäisestä vapaan kalkin määrästä. Pitkällä aikavälillä paisumista aiheuttavan magnesiumoksidin määrä on Suomen LD-teräskuonissa pienempi kuin useimmissa muissa maissa tuotetuissa teräskuonissa.

Päällysteseoksissa teräskuona on ominaisuuksiltaan keskimääräisesti katsoen yhtä hyvä tai parempi kuin perinteiset luonnonmateriaalit. Suuresta painosta aiheutuvat korkeammat kuljetuskustannukset on eliminotavissa, koska teräskuona-asfalttikerros voidaan monissa tapauksissa tehdä ohuemmaksi kuin tavanomaisesta kiviaineksesta valmistettu seos. Teräskuonaa käytettäessä voidaan osa runkoaineesta korvata edullisemmalla ja huonommalla materiaalilla.

Tien kantavassa ja jakavassa kerroksessa teräskuonaa voi käyttää joko sellaisenaan tai seoksissa. Pelkkää teräskuonaa käytettäessä voi sen ominaisuuksia hyödyntää monissa tapauksissa samalla tavalla kuin masuunikuonalla. Teräskuonasta tehty sitomaton rakennekerros lujittuu hitaasti ajan kuluessa, joten se muuttuu ominaisuuksiltaan vähitellen ainakin jossain määrin puolijäykkää rakennetta muistuttavaksi.

Seoksissa teräskuonaa voi käyttää masuunihiekan, masuunikuonamurskeen ja luonnonkiviaineksen kanssa. Tällöin tavoitteena on puolijäykkä rakenne. Seoksessa teräskuona paitsi lujittuu itse, se voi myös toimia esimerkiksi

kalkin lähteenä masuunihiekan hydrataatioreaktiossa. Seosrakenteissa masuunikuona, luonnonkiviaines tai molemmat toimivat myös teräskuonassa mahdollisesti ilmenevän tilavuuden epästabiilisuuden tasoittajina. Seoksia tutkittaessa ovat seossuhteet vaihdelleet huomattavasti. Näyttäisi kuitenkin siltä, että parhaimpia rakennekerroksissa ovat seokset, joissa on teräskuonaa alle 50 % ja loppuosa on joko masuunikuonaa, luonnonkiviainesta tai molempia. Myös kalkkia on edellisten lisäksi käytetty. Tällöin saadaan parannettua kuonan sitoutumista. Suositeltavaa raekokoa 20-25 mm suurempiakin lajitteita on käytetty ja näistäkin kokemukset ovat olleet hyviä.

Penkereissä ja täytöissä teräskuonaa on määrällisesti käytetty paljon. Tällöin ei tarvitse kiinnittää huomiota kuonan tilavuuden muutoksiin eikä tarveta vanhentamiseen juurikaan ole.

Massa- ja syvästabiloinnissa on käyttö sen sijaan ollut vähäistä. Muutamissa tutkimuksissa saatujen hyvien tulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että tällä tienrakennuksen alueella teräskuonan tutkimusta olisi syytä lisätä.

Teräskuonan käytössä tulisi pyrkiä nimenomaan hyötykäyttöön. Tällöin kuonan käyttö esimerkiksi penkereissä ja täytöissä ei ole hyötykäyttöä vaan lähinnä läjitystä, koska niissä ei hyödynnetä teräskuonan tienrakennuksen kannalta hyviä ominaisuuksia.

LD-teräskuona on materiaali, jonka käytössä olisi hyödynnettävä mahdollisimman tehokkaasti sen hyviä ominaisuuksia. Rakennekerroksissa teräskuona voi korvata ainakin osittain kappalekuonan ja kuonamurskeen. Käyttö massiivirakenteena ei ole paras mahdollinen. Tällöin tulee kysymykseen LD-teräskuonasta, masuunihiekasta ja luonnonkiviaineksesta tehtyjen seosten kehittäminen. Yhtenä kehitystyön kohteena on LD-teräskuonan käyttö aktivaattorina ainakin joissakin stabilointikohteissa sementin korvaajana. Ei pidä myöskään sulkea pois LD-teräskuonan käyttöä massa- ja syvästabiloinnissa.

KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Alkio, R. & Eerola, M. & Lampinen, A. & Manninen, E., Kuonien käyttö tienrakennuksessa (The use of slags in road construction). VTT Tiedotteita 661. Espoo 1987. 62 s.
2. Asfalttinormit 1995. PANK r.y. (Päällystealan neuvottelukunta), Helsinki 1995. 66 s.
3. Bullen, F., Strengths and resilient modulus for crusher run blast furnace slag and additives. Utilisation of steelplant slags, symposium Wollongong, Australia 1979. ss. 7-15.
4. Choquet, F., Etude en laboratoire des possibilités de valorisation des scories d'acières et des laitiers de haut-fourneau en construction routière. Centre de Recherches Routiers. CR 22/84, 1984.
5. Daube, J., Etude de la valorisation de scories d'aciére L.D. Silicates Industriels, nr 2, 1982.
6. Emery, J.J., New uses of metallurgical slags. CIM Bulletin, vol. 68, no 764/1975. ss. 60-68.
7. Emery, J.J., Slags. Proceedings of the 5th Mineral Waste Utilization Symposium. Chicago 1976. ss. 291-300.
8. Emery, J.J., Slag Utilization in pavement construction. Extending Aggregates Resources. ASTM STP 774. Orlando 1982. ss. 95-118.
9. Emery, J.J., Steel slag utilization in asphalt mixes. 1986 annual conference proceedings vol. 1. ss. C3-C19.
10. Emery, J.J., Use of wastes and byproducts as pavement construction materials. International Pavement Management/Maintenance Exposition & Conference. Atlanta 1992. ss. 14-18.
11. Geiseler, J., Verwertung der Stahlwerkschlacken. Stahl u. Eisen 111 1/1991. ss. 133-138.
12. Geiseler, J., Use of by-products - A German view. Utilization of steel slags - Possibilities and environmental impacts. Useita artikkelieita. 1994. Sama myös: Steel slag - 'generation, processing and utilization'. Proceedings of the International Symposium on Resource Conservation and Environmental Technologies in Metallurgical Industries. Toronto 1994. ss. 87-97.

13. Hiltunen A. & Hiltunen, R., The properties of steel slags and their influence on developing the utilization of steel slags. Seminar on the Processing, Utilization and Disposal of Waste in the Steel Industry. Balaton-széplak (Hungary) 3-6 June 1996. 20 s.
14. Hiltunen, A. & Putro, J. & Pöyliö, E., Production, use and improved utilization of the by-products of blast furnace based steel works in Finland (Suomen masuunipohjaisen terästeollisuuden sivutuotteiden valmistus, käyttö ja kehittäminen). Seminar on the Steel Industry and Recycling. Düsseldorf 1995. 22 s.
15. Höbeda, P., Stålslagg från LD-processen som vägmateriäl - en "state of the art" rapport. VTI notat Nr V193. Linköping 1992.
16. Jones, D.E., Application of steel plant by-products to roadworks. Proceedings of the 11th Australian Road Research Board Conference, Melbourne 1982. ss. 106-109.
17. Juckes, L.M. & Thomas, G.H., Self-binding composites of blast furnace and LD slag for road base coarses. Commission of the European Communities. Information day on utilization of blast furnace and steelmaking slags, Liège, 1988.
18. Kagawamura, M. et al., Effective utilization of LD converter slag as a soil stabilizer, 2nd Australian Conf. Eng. Mat., 1981.
19. Kohler, G., Selbsterhärtende Tragsichten aus Eisenhüttenschlacken. Eisenhüttenschlacken, Umweltverträgliche Baustoffe. Referate der 5. Vortragsveranstaltung am 06. Februar 1992 in Düsseldorf. Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken (FEhS), Heft 2. ss. 69-89.
20. Krebs, H.G. et al., Untersuchungen zur Verwertbarkeit von Stahlwerksschlacken von LD-Typ als Mineralstoffe für den Strassenbau, insbesondere in Deckschichten. Forschung und Strassenverkehrstechnik, Heft 253, 1978.
21. Lappi, J., Kuonatuotteiden käyttö sidottuna maarakenteena. Oulun yliopisto, Rakentamistekniikan osasto, Geotekniikan laboratorio, diplomityö. Oulu 1990. 59 s.
22. Lemass, B., Slag solutions for heavy duty road pavements. Proceedings, 16th ARRB conference, 9 - 13 November 1992, vol 16, part 2. Australia 1992. ss. 105-118.
23. Lewis, D.W., Resource conservation by use of iron on steel slags. Extending Aggregate Resources. ASTM STP 774. Orlando 1982. ss. 31-42.

-
24. Manninen, E., Nurmijärven päällystekoetie v. 1979. Yhteenveto. VTT Tutkimuksia 400. Espoo 1986. 50 s.
 25. Manninen, E., Päällystekoetie Nurmijärvellä 1979. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, Tutkimusselostus 186. Espoo 1980. 60 s.
 26. Manninen, E., Terästeollisuuden kuonien käyttö tienpäällysteissä, kenttä-tutkimukset vuonna 1980. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo 1981. 22 s.
 27. Manninen, E., Terästeollisuuden kuonien käyttö tienpäällysteissä, laboratoriotutkimus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio. Tutkimusselostus 207. Espoo 1980. 22 s.
 28. Manninen, E., Terästeollisuuden kuonien käyttö tienpäällysteissä, kenttä-tutkimukset vuonna 1981. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo 1982. Tutkimusselostus 299. 44 s.
 29. Montgomery, D.G. & Wang, G., Engineering uses of steel slag - a by-product material. Environmental Management, Geo-Water & Engineering Aspects, Crowdhury & Sivakumar. Rotterdam 1993. ss. 379-385.
 30. Motz, H., Stahlwerksschlacken für Tragsichten ohne Bindemittel. Eisenhüttenschlacken, Umweltverträgliche Baustoffe. Referate der 5. Vortragsveranstaltung am 06. Februar 1992 in Düsseldorf. Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken (FEhS), Heft 2. ss. 90-104.
 31. Motz, H. & Kohler, G. & Thomassen, K., Selbsterhärtende Tragsichten aus Eisenhüttenschlacken. Eisenhüttenschlacken, Eigenschaften und Verwertung. Referate aus dem Zeitraum 1988 bis 1991. Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken (FEhS), Heft 1. ss. 116-139.
 32. Mäkiyö, M., Tien runkoaineksen vaikutus stabilointiin granuloiduilla masuunikuonatuotteilla. Oulun yliopiston geotekniikan laboratorion julkaisuja 22 (lissensiaatintyö). Oulu 1995. 100 s. + liitteet 28 s.
 33. Mäkiyö, M. & Hiltunen, A., Utilization of the technical properties of LD slag in the construction of roads. Seminar on the Processing, Utilization and Disposal of Waste in the Steel Industry. Balatonszéplak (Hungary) 3-6 June 1996. 10 s.
 34. Narita, K. & Onoye, T. & Takata, Z., Weathering mechanism of LD converter slag. Tetsu To Hagane 10/1978. ss. 1558-1567.

35. Nishi, M. et al., Performance of flexible pavements with slag bases. Proc. 7th Asian Regional Conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, Haifa 1983.
36. Nomura, T. & Enokido, T., Study on utilization of BOF slag as road base material. Nippon Steel Technical Report Overseas. 17/1981. ss. 22-32.
37. Noureldin, A.S. & McDaniels, R.S., Evaluation of surface mixtures of steel slag and asphalt. Transportation research record Washington D.C., USA 1990. ss. 133-149.
38. Ono, S. & Tsuzimatsu, H. & Kinoshita, S. & Hirano, M., Blast granulation system of BOF slag and its products. Nippon Kokan Technical Report Overseas No.38/1983. ss. 87-92.
39. Panis, R., Emploi des scories L.D. en technique routiere. Valorisation et elimination des dechets et sous-produits industriels et urbains. LCPC. Journées de Bilan de l'Action de Recherche no 36, Le Bourget, 1983.
40. Putro, J., Integroidun terästehtaan sivutuotteet. Metallurgisen teollisuuden sivutuotteiden hyötykäyttö, AEL-INSKO -seminaari. Vantaa 1994. Luento 3.
41. Ramaswamy, S.D., Utilisation of steel slag for road surfacing in Singapore. 13th ARRB - 5th REAAA combined conference, 25-29 Aug. 1986. ss. 11-16.
42. Rautio, T., Masuunikuona tien kantavan kerroksen sitomisessa. Oulun yliopisto, Rakentamistekniikan osasto, Tie- ja liikennetekniikan laboratorio, diplomityö. Oulu 1993. 75 s.
43. Sherwood, P.T., The use of waste materials in fill and capping layers. Transport Research Laboratory, Contractor Report 353. Berkshire 1994. ss. 51-53.
44. Sherwood, P.T., A review of the use of waste materials and by-products in road construction. Transport Research Laboratory, Contractor Report 358. Berkshire 1994. ss. 9, 28-29.
45. Suito, H. & Inoue, R., Slag utilization in Japan. Utilization of steel slags - Possibilities and environmental impacts. Useita artikkeleita. 1994.
46. Teräskirja. Suomen Teräksen- ja Metallintuottajien Yhdistys r.y. Helsinki 1995. 68 s.

47. Thom, N.H. & Brown, S.F., The machanical properties of unbound aggregates from various sources. Proceedings of the 3th International Symposium on Unbound Aggregates in Roads (UNBAR 3). Nottingham 1989. ss. 130-142.
48. Thomas, G.H., Slags, General report. International Conference on the Use of By-products and Waste in Civil Engineering. Paris 1978. ss. 71-79.
49. Thomas, G.H. & Stephenson, I.M., The development of LD slag as an aggregate for road construction. Proceedings of the utilisation of steelplant slags symposium 1979.
50. Torii, K. & Kawamura, M., Strength development and reaction products of compacted powdered basic oxygen furnace slag - granulated blastfurnace slag mixture. Journal of the Society of Materials Science 1991, Japan. ss. 1518-1524.
51. Verhasselt, A. & Choquet, F., Steel slags as unbound aggregate in road construction: Problems and recommendations. Proceedings of the 3th International Symposium on Unbound Aggregates in Roads (UNBAR 3). Nottingham 1989. ss. 204-211.
52. Wachsmuth, F. & Geiseler, J. & Fix, W. & Koch, K. & Schwerdtfeger, K., Contribution to the structure of BOF-slags and its influence on their volume stability. Canadian Metallurgical Quarterly. 3/1981. ss. 279-284.

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 22/1996 Liikennejärjestelmän suunnittelu kehittyvässä maaseututaajamassa; Esimerkkikohteena Iitin kunnan Kausalan taajama. TIEL 3200390
- 23/1996 Täydentävä uudistaminen; Mahdollisuuksia maankäytön ja liikenteen kestävään vuorovaikutukseen kaupunkiseuduilla. TIEL 3200391
- 24/1996 Bitumiemulsion käyttö soratien pölynsidonnassa. TIEL 3200392
- 25/1996 Ruuhkaisuuden kokeminen ja liikennetilannetiedottaminen - tienkäyttäjätutkimus kaksikaistaisilla teillä. TIEL 3200393
- 26/1996 Tieverkon laajuus kustannusvastaavuuden näkökulmasta. TIEL 3200394
- 27/1996 Liikenteen vertailutietoja eri maista. TIEL 3200395
- 28/1996 Tien uudelleenrakentamisen vaikutukset kylien elinvoimaan; Esimerkkinä Lahti-Orimattila-tieyhteys. TIEL 3200396
- 29/1996 Tien rakennekerrosmateriaalin stabilointi masuunikuonatuotteilla. TIEL 3200397
- 30/1996 Strategisen vaikutusarvioinnin kehittäminen. TIEL 3200398
- 31/1996 Ympäristöohjelma ja yhteistoiminta; Yhteistyö tielaitoksen ympäristön toimenpideohjelman 1997-2000 toteutuksessa. TIEL 3200399
- 32/1996 Häiriintymättömien maanäytteiden otto. TIEL 3200400
- 33/1996 Ödometrikoe. TIEL 3200401
- 34/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Täydentävien kuormituskokeiden tulokset, Osa 1. TIEL 3200402
- 35/1996 Havaintoteiden asfalttipäällysteiden moduulit. TIEL 3200403
- 36/1996 Eriste- ja kevennysmateriaalien routakestävyys; Palaturve. TIEL 3200404
- 37/1996 Koerakennekohteiden materiaalien routakestävyys; Pohjoiset kohteet TIEL 3200405
- 38/1996 Rakennieratkaisujen alustava suunnittelu ja kehittäminen. TIEL 3200406
- 39/1996 Pilari- ja massastabiloinnin tuotantotekniikka. TIEL 3200407
- 40/1996 Suurten liikennehankkeiden vaikutus kaupunkien kehitykseen. TIEL 3200408
- 41/1996 Yleisten teiden ympäristön tila - maisema. TIEL 3200409
- 42/1996 Yleisten teiden ympäristön tila; Tiepiirien tilaselvitysten yhteenveto. TIEL 3200410
- 43/1996 Tielaitoksen ympäristöraportti 1995; Vuosiraportti Tielaitoksen toiminnan ympäristönäkökohdista. TIEL 3200411
- 44/1996 Sitomattomien materiaalien moduulit; Muutosmoduulin arviointi karkearakeisilla kiviaineksilla, Osa 2. TIEL 3200412
- 45/1996 Eurooppatie E18-hankkeen ympäristöpoliittinen analyysi. TIEL 3200413